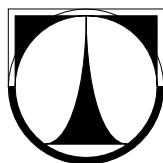


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2012

Petr Oščiatka

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1802R022 – Informatika a logistika

**Záznam difraktivních struktur
rekonstruovatelných v bílém světle**

Recording of white light diffractive structures

Bakalářská práce

Autor:

Petr Oščiatka

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Psota

Konzultant:

Ing. Roman Doleček

V Liberci 13. 5. 2012

Zadání – originál

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Abstrakt

Tato práce zkoumá existující postupy výroby difraktivních struktur rekonstruovatelných v bílém světle holografickou cestou a jejich praktickou realizaci na stříbrohalidové jemnozrné fotografické emulze. Nejprve byl vytvořen reflexní hologram pomocí jednosvazkového Děnisjukova schématu, poté byl zaznamenán reflexní hologram mimoosovým schématem podle Leith-Upatnieka a nakonec proběhla realizace transmisního hologramu, jehož rekonstrukcí konjugovanou vlnou byla vytvořena reflexní kopie. Tato kopie má zaznamenaný objekt posunutý oproti předloze do roviny hologramu. Hologramy procházejí mokrým vyvolávacím procesem. V případě reflexních hologramů byla použita rekonstrukce v bílém světle.

Abstract

This bachelor thesis deals with already existing procedures of the production of white light holographic diffractive structures and their recording on the fine-grained silver halide photographic emulsion. It was first built Děnisjuk single-beam reflection scheme, then Leith-Upatnieks double-beam reflection scheme and finally was realized transmission hologram, whose reconstruction of the conjugate wave was created reflective copy. This copy of the recorded master has shifted object to the hologram plane. The holograms are made with a wet film developing process. For the reconstruction of reflection holograms was used the white light.

Obsah

Prohlášení.....	3
Abstrakt.....	4
Seznam obrázků	7
Úvod	9
1. Optické základy	11
1.1 Světelné vlny	11
1.2 Interference	14
1.3 Difrakce	15
1.4 Koherence	17
1.4.1 Časová koherence	17
1.4.2 Prostorová koherence	18
2. Mřížky.....	20
2.1 Tenká mřížka	22
2.1.1 Tenká amplitudová mřížka	22
2.1.2 Tenká fázová mřížka	22
2.2 Objemové mřížky	23
2.2.1 Objemové transmisní mřížky	24
2.2.2 Objemové reflexní mřížky	25
2.3 Vytvoření harmonické difrakční mřížky	25
3. Holografie.....	27
3.1 Nejběžnější typy hologramů	28
3.1.1 Transmisní hologramy	28
3.1.2 Reflexní hologramy	29
3.1.3 Duhové hologramy	29
3.2 Záznamová media	30
3.3 Záznam hologramů.....	31
3.4 Lippmanova fotografie	34
4. Experimentální část.....	37
4.1 Použité optické prvky a nástroje	37
4.1 Záznam mimosového transmisního hologramu.....	38
4.2 Záznam reflexního hologramu Dēnisjukovou metodou.....	41
4.3 Záznam reflexního hologramu mimoosovou metodou	43
4.4 Kopírování hologramu.....	45

4.5	Vyvolání hologramu	50
4.6	Rekonstrukce hologramu v bílém světle	52
	Závěr.....	54
	Bibliografie	56

Seznam obrázků

Obr. 1: Světelná vlna a vlnoplocha	13
Obr. 2: Přechod kulové vlny (vlevo) přes parabolickou vlnu (uprostřed) až na rovinnou vlnu (vpravo).	14
Obr. 3: Huygensův princip šíření světla	15
Obr. 4: Fresnelův princip, difrakční integrál.	16
Obr. 5: Fresnelova a Fraunhoferova zóna. Fraunhoferův ohyb je znázorněn čárkovaně.	17
Obr. 6: Časová koherence	18
Obr. 7: Prostorová koherence	19
Obr. 8: Difrakční mřížka	20
Obr. 9: Jednodimenzionální kvaziperiodická fázová mřížka.....	20
Obr. 10: Úhlový fázový synchronismus. V daném směru dochází k načítání příspěvků jednotlivých period.	21
Obr. 11: Fázový objemový synchronismus braggovský pro $Q > 10$	23
Obr. 12: Selektivita úhlová a selektivita vlnové délky objemové transmisní fázové mřížky a její vliv na normalizovanou difrakční účinnost. Parametr χ je měřítkem odchýlení od Braggovy podmínky, křivky pro tři různé hodnoty modulačního parametru Φ	24
Obr. 13: Maximální difrakční účinnost objemové fázové transmisní (A) a reflexní (B) mřížky při Braggově úhlu jako funkce modulačního parametru Φ	25
Obr. 14: Vytvoření difrakční mřížky pomocí dvou koherentních svazků.....	26
Obr. 15: První trojrozměrný hologram. Autoři: Leith a Upatnieks.	27
Obr. 16: Účinnost difrakce vlnových délek (a) a účinnost úhlů dopadu rekonstrukční vlny (b) reflexního a transmisního hologramu.....	28
Obr. 17: Difrakce na objemové mřížce.	29
Obr. 18: Nejběžnější způsoby záznamu hologramů. Osový (vlevo), mimoosový (uprostřed) a Děnisjukův hologram (vpravo).....	32
Obr. 19: Schéma záznamu osového hologramu.	32
Obr. 20: Schéma záznamu mimoosového transmisního hologramu.	33
Obr. 21: Děnisjukovo schéma záznamu hologramu.	34
Obr. 22: Princip záznamu Lippmanovi fotografie.	35
Obr. 23: Záznam transmisního hologramu mimoosovou metodou.	39
Obr. 24: Snímaný objekt (vlevo) a jeho laserem rekonstruovaný transmisní hologram.	40
Obr. 25: Záznam reflexního hologramu pomocí jedné větve. Při tomto způsobu záznamu interferuje referenční svazek se světlem odraženým od zaznamenávaného předmětu.....	41
Obr. 26: Snímaný objekt (vlevo) a v bílém světle rekonstruovaný reflexní hologram (vpravo).....	42
Obr. 27: Rekonstruované reflexní hologramy pomocí referenční vlny laseru. Fotografováno z různých úhlů.	43
Obr. 28: Schéma záznamu reflexního hologramu.....	44
Obr. 29: Zaznamenávaný objekt (vlevo) a rekonstrukce hotového hologramu v bílém světle (vpravo).	45
Obr. 30: Reflexní hologram rekonstruovaný svazkem laseru se záznamovým objektem v pozadí (vlevo). Reflexní hologram rekonstruovaný laserem (vpravo).	45

<i>Obr. 31: Kopírování hologramu se změnou pozice původního objektu. Objekt mění pozici podle umístění kopírovacího média před (a), do (b) nebo za ohniskovou vzdálenost reálného obrazu (c). Rovinu reálného obrazu určíme pomocí stínítka. Jak vypadá určení roviny reálného obrazu pomocí posouvání stínítka, ukazuje obrázek d, na kterém je vidět ostrý obraz projektovaný transmisním hologramem na stínítka.</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 32: Projekce virtuálního objektu pomocí transmisního hologramu</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 33: Vytváření reflexní kopie hologramu z transmisního masteru.</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 34: Rekonstrukce reflexního hologramu v bílém světle (vlevo) a rekonstrukce laserem (vpravo).</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 35: Difrakční účinnost (vlevo) a spektrální citlivost (vpravo) PFG-03C.</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 36: Posloupnost vyvolávání stříbrohalidové emulze.</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 37: Rekonstrukce reflexního hologramu v bílém světle (vlevo) a jeho vyfotografování (vpravo).</i>	<i>53</i>

Úvod

Holografie se datuje od roku 1948, kdy Britský vědec Dennis Gabor jako vedlejší produkt své práce na vylepšení rozlišení elektronového mikroskopu vynalezl holografii. Přesto se někdy považuje za úplný počátek holografie práce francouzského vědce Gabriela Lippmana. Lippmann získal v roce 1908 Nobelovu cenu za metodu reprodukce barevné fotografie založené na interferenci pomocí stojatých vln. Fotografie nabízí pouze jeden pohled na realitu, zredukovaný na jediný obraz zafixovaný na ploše, stejně jako je to u nákresu nebo malby. To lze obejít použitím hologramu, který zachycuje celou 3D informaci.

Hologram je fotograficky nebo jinak zaznamenaný interferenční obrazec vlnového pole mezi světlem odraženým od zaznamenávaného objektu a koherentním pozadím ve formě referenční světelné vlny. Obsahuje informace o celém trojrozměrném vlnovém poli. Tyto informace jsou zakódovány v podobě interferenčních proužků o vysokých prostorových frekvencích. Objektová vlna může být rekonstruována ozářením hologramu referenční vlnou. Takto rekonstruovaná vlna je k nerozeznání od původní objektové vlny. Obsahuje trojrozměrný obraz původního objektu viděný klasickou perspektivou a hloubkou ostrosti.

V laboratorních optických metod Technické Univerzity v Liberci se doposud vyráběly difraktivní struktury, které musely být rekonstruovány za přísných podmínek na vlnovou délku rekonstrukční vlny. Tyto hologramy nelze rekonstruovat po změně uspořádání prvků na laboratorním stole, či s použitím laseru s rozdílnou vlnovou délkou. V poslední době se přechází na digitální holografii, kdy se zaznamenává na CCD kameru a vlastní rekonstrukce hologramu se provádí na počítači. Tato digitální holografie se používá především pro měřicí účely, nikoliv pro vizualizaci 3D záznamu.

V portfoliu ale chybí hologramy, které lze rekonstruovat v bílém světle, a které poslouží především pro demonstrativní a pedagogické účely. Jejich hlavní výhodou je možnost rekonstrukce prakticky kdekoli, aniž by bylo vyžadováno náročné vybavení optických laboratoří včetně laseru. Právě těmito hologramy se bude práce zabývat.

První část práce se zaměřuje na teoretické základy potřebné pro pochopení a osvojení vlastností světla a jeho šíření v prostoru. Druhá část se věnuje difrakčním strukturám a jejich účinnostem. Třetí část práce mapuje druhy hologramů, jejich vlastnosti a možnosti záznamu hologramů. Poslední čtvrtá část je praktického zaměření. Zabývá se difrakčními strukturami rekonstruovatelnými v bílém světle. Prochází základní způsoby záznamu a možnosti kopírování hologramů. Také prochází celý náročný mokrý vyvolávací proces holografických desek PFG-03C a následnou rekonstrukci obrazu hologramu po jeho vyvolání.

1. Optické základy

1.1 Světelné vlny

Světlo se projevuje jako příčná elektromagnetická vlna s časově proměnným elektrickým a magnetickým polem. Viditelné světlo je elektromagnetické záření o vlnové délce 400-750 nm. Při delší vlnové délce se jedná o infračervené záření, při kratší vlnové délce se jedná o ultrafialové záření. Šíření světla je popsáno vlnovými rovnicemi, které vycházejí z Maxwellových rovnic:

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \\ \nabla \times E &= -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}, \\ \nabla \cdot E &= 0, \\ \nabla \cdot H &= 0,\end{aligned}\tag{1.1}$$

kde $(\nabla \times)$ je operátor vlny, $(\nabla \cdot)$ je operátor divergence a E , H je vektor intenzity magnetického pole, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ je permeabilita vakua a $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$ je permitivita vakua. [1]

Z vlastností vln a Maxwellových rovnic můžeme odvodit vlnovou rovnici pro E :

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0,\tag{1.2}$$

kde $c_0 = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}} = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ je konstanta rychlosti světla, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ je Laplaceův operátor, x , y , z jsou Kartézské prostorové souřadnice a t je čas. [1]

Nejdůležitější řešení vlnových rovnic je harmonická vlna. Pokud uvažme, že je oscilující vlna v poloze $Z = 0$:

$$E(0, t) = E_0 \cos(\omega t + \varphi),\tag{1.3}$$

poté pro určitý bod ve vzdálenosti z od zdroje platí:

$$E(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi), \quad (1.4)$$

kde E_0 je reálná amplituda vlny a vztah $(\omega t - kz + \varphi)$ určuje fázi vlny. Vlnové číslo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, kde λ je vlnová délka.

Užití goniometrických funkcí vede k velmi složitým výpočtům, kterým se lze vyhnout použitím goniometrického vyjádření:

$$e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi,$$

kde $j = \sqrt{-1}$ je imaginární číslo. Rovnice pro harmonické vlny v komplexním oboru označíme U (kde funkce U představuje kterékoliv z komponent elektrické intenzity E nebo složek magnetické intenzity H) můžeme psát jako:

$$\begin{aligned} U(z, t) &= U_0 e^{j(\omega t - kz + \varphi)} = \\ &= E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi) + jE_0 \sin(\omega t - kz + \varphi). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Z (1.5) a (1.4) je zřejmé, že $E(z, t) = \text{Re}\{U(z, t)\} = \frac{1}{2}[U(z, t) + U^*(z, t)]$. Během většiny jevů fyzikální optiky se frekvence v čase nemění, tudíž můžeme vynechat část $e^{-j(\omega t)}$ a budeme uvažovat pouze tzv. komplexní amplitudy nezávislé na čase:

$$U(z) = U_0 e^{j(kz - \varphi)}, \quad (1.6)$$

popřípadě v obecné formě:

$$U(r) = U_0 e^{j(kr - \varphi(r))}, \quad (1.7)$$

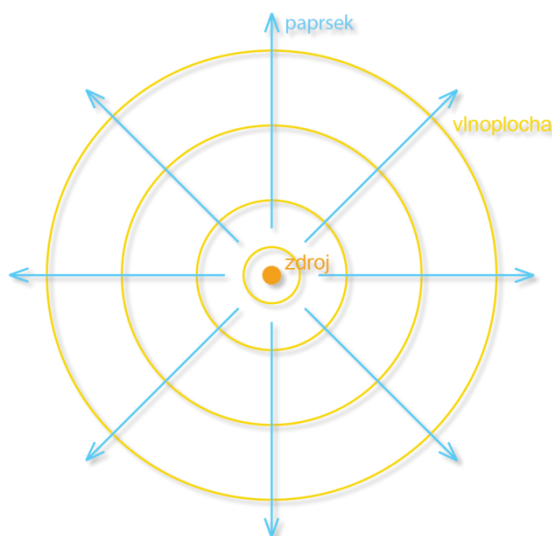
kde $r = (x, y, z)$ je polohový vektor, $k = (k_x, k_y, k_z)$ a zároveň $|k| = \frac{2\pi}{\lambda} = k$ je vlnové číslo.

Po dosazení rovnice $E(r, t) = U(r, t) = U(r)e^{-j(\omega t)}$ do vlnové rovnice (1.2) získáme diferenciální rovnici:

$$(\nabla^2 + k^2)U(r) = 0, \quad (1.8)$$

která se nazývá Helmholtzova rovnice. Všechny harmonické vlny popsané komplexní amplitudou se musí řídit Helmholtzovou rovnicí. [2]

V optice používáme výraz vlnoplocha, což je plocha, na níž kmitají body se stejnou fází (slovo vlnoplocha používáme i u křivek). Kolmici k vlnoploše v daném bodě nazýváme paprsek. [3]



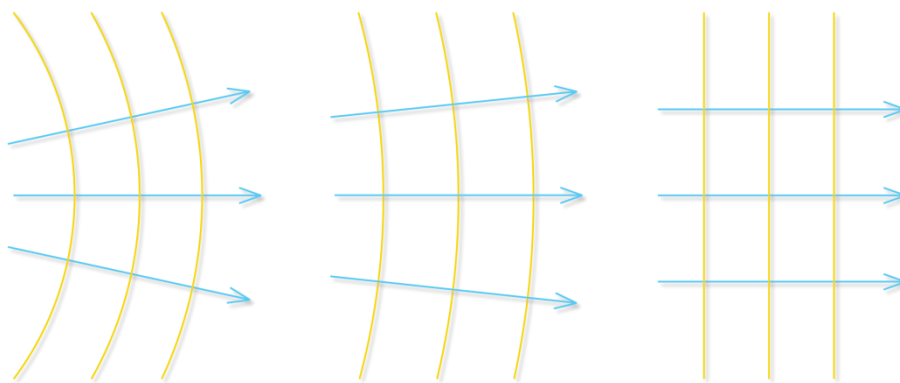
Obr. 1: Světelná vlna a vlnoplocha

Rozlišujeme dva základní druhy vlnoplochy podle tvaru a to rovinnou vlnoplochu a sférickou vlnoplochu. Prostředí, v němž se vlnoplochy šíří dělíme na homogenní, nehomogenní, izotropní a neizotropní. Nejjednodušší je homogenní izotropní prostředí, kde se vlnění šíří všemi směry stejnou rychlostí. Máme-li bodový zdroj v tomto prostředí, pak se vlnění šíří sférickou vlnoplochou (Obr. 1), s komplexní amplitudou U :

$$U = \frac{U_0}{r} e^{jkr}, \quad (1.9)$$

kde r je poloměr vlny a x je vzdálenost od zdroje.

Ve vzdálenosti od bodového zdroje, kde je poloměr vlnoplochy tak velký, že okolí zkoumaného bodu můžeme považovat za rovinu, aproximujeme sférickou vlnu vlnou rovinou $U = U_0 e^{jkx}$. V nehomogenním popřípadě neizotropním prostředí je chování vlny silně závislé na vlastní podstatě prostředí. [3]



Obr. 2: Přechod kulové vlny (vlevo) přes parabolickou vlnu (uprostřed) až na rovinnou vlnu (vpravo).

1.2 Interference

Interference znamená vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetávání jevů či hmoty. V optice se jedná o skládání vlnění, kde v daném místě vzniká struktura, která se v případě monochromatického světla projevuje vznikem světlých a tmavých proužků. V případě světla bílého se může projevit vznikem duhovosti. [4]

Aby byla interference pozorovatelná pouhým okem, je důležitá její neměnnost v čase. Toho dosáhneme použitím dostatečně koherentního světelného zdroje. Musí tedy mít v daném místě dostatečně stejnou fázi, neměnicí se s časem. Přirozené zdroje světla jsou koherentní jen na velmi malé vzdálenosti (0,01 mm). Pokrok nastal až s vynálezem laseru, díky kterému je umožněno pozorovat interferenci při dráhových rozdílech až několik desítek metrů. [4]

Složíme-li dvě monochromatické vlny s komplexními amplitudami $U_1(r), U_2(r)$, výsledná vlna je taktéž monochromatická (se stejnou frekvencí) a její intenzita je:

$$\begin{aligned} I &= |U(r)|^2 = |U_1(r) + U_2(r)|^2 = \\ &= |U_1(r)|^2 + |U_2(r)|^2 + U_1(r)U_2^*(r) + U_1^*(r)U_2(r). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Použitím $U_1 = \sqrt{I_1}e^{j\varphi_1}$ a $U_2 = \sqrt{I_2}e^{j\varphi_2}$, kde φ_1, φ_2 jsou odpovídající vlnové fáze, můžeme upravit na:

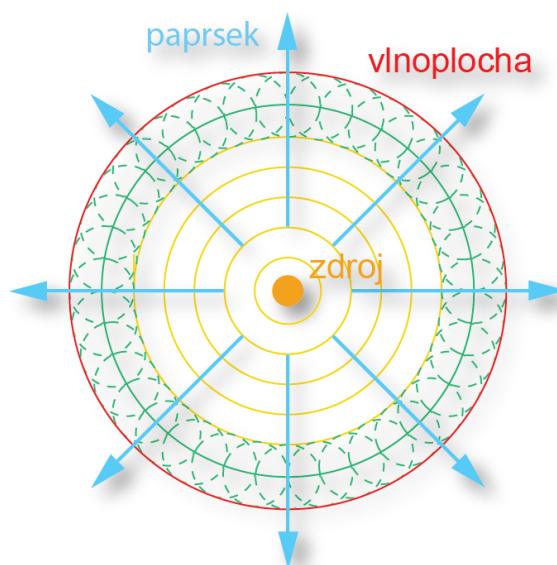
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi. \quad (1.11)$$

Tento vztah nazýváme interferenční rovnicí. [2]

V roce 1801 Thomas Young přišel na způsob, jakým lze pozorovat interferenci přírodního světla. Při jeho pokusu dopadá světlo bodového zdroje na dvojici štěrbin. Při malé vzdálenosti štěrbin dochází k interferenci světla za štěrbinami a na stínítku, které je za nimi umístěno, se u osy x pozoruje interferenční obrazec. V místech s maximální intenzitou interferují vlnění o stejné fázi a vzájemně se zesilují. V místech s minimální intenzitou interferují vlnění s opačnou fází a vzájemně se oslabují. [5]

1.3 Difrakce

Ačkoli existuje několik přístupů k řešení difrakce, nejjednodušší a fyzikálně nejprůhlednější je přístup Fresnela, který využívá Huygensova principu (Obr. 3). Huygensův princip říká, že každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něj šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch. Vlnění, které vybudí zdroj, můžeme nahradit vlněním vybuzeným body, ke kterým se vlnění dostalo v některém z předchozích okamžiků (třeba od bodů na úrovni překážky). [3]

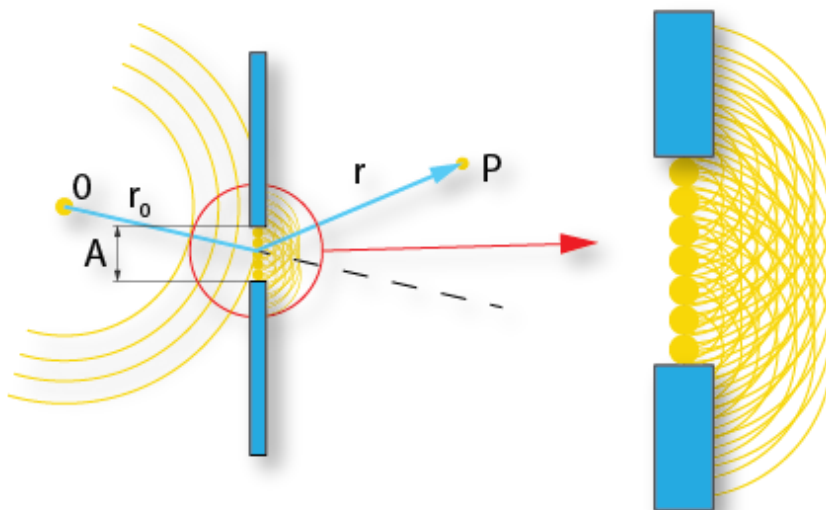


Obr. 3: Huygensův princip šíření světla

Předpokládejme, že v neprůhledném nekonečném stínítku je apertura A (Obr. 4), na který dopadá z bodu O kulová vlna o amplitudě U_0 . Každý element dopadající kulové vlny o radiusu vektoru r_0 a ploše dA v místě otvoru A generuje do druhého poloprostoru sekundární kulovou vlnu, která do bodu P , vzdáleného r , přispívá diferenciální amplitudou [6]:

$$U(P) = U_0 \iint_A \frac{e^{ik(r_0+r)}}{r_0 r} K(\chi) dA, \quad (1.12)$$

kde $K(\chi)$ je inklinční faktor charakterizující úhlovou závislost vyzařování sekundární vlny v závislosti na úhlu normály dopadající vlnoplochy a normály vlny sekundární směřující do sledovaného bodu P .



Obr. 4: Fresnelův princip, difrakční integrál.

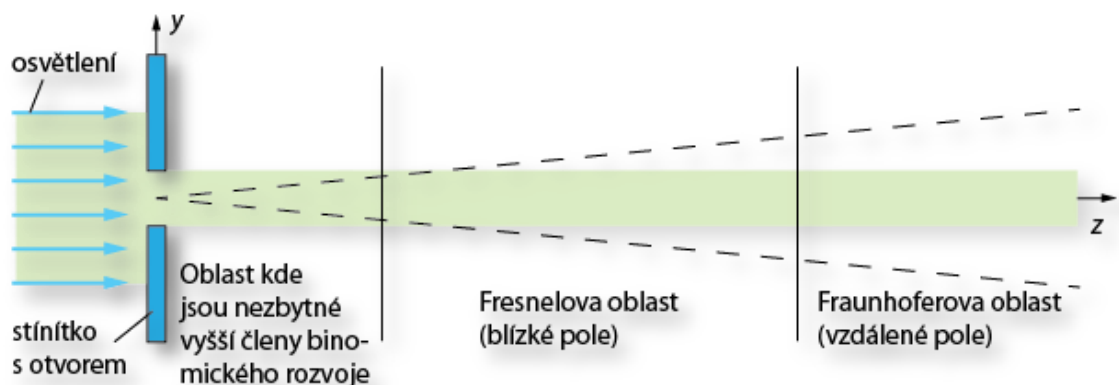
Předpokládáme úhlovou závislost takovou, aby byl příspěvek pro $\chi = 0$ maximální a pro $\chi = \frac{\pi}{2}$ byl nulový. Fresnel objevil kosinovou závislost na χ . Rozdělil si příspěvky z původní kulové vlnoplochy na úseky s rozdíly optických drah $\lambda/2$. Integrací přes celou vlnoplochu získal hodnotu prvního příspěvku o amplitudě i/λ , která určuje i amplitudu inklinčního faktoru [6]:

$$K(\chi) = \frac{i}{\lambda} \cos \chi, \quad (1.13)$$

po dosazení do rovnice 1.12 dostaneme Fresnelův difrakční integrál:

$$U(P) = \frac{iU_0}{\lambda} \iint_A \frac{e^{-ik(r_0+r)}}{r_0 r} \cos\chi \, dA. \quad (1.14)$$

Analogické řešení tohoto integrálu je poměrně složité a pro některé apertury téměř neřešitelné. Proto Fresnelova aproximace nahrazuje sekundární kulové vlny vlnami s parabolickou vlnoplochou, čímž se výpočet značně zjednodušuje. Fraunhoferův difrakční vzorec dokonce používá rovinné vlnoplochy. Těmito zjednodušení se použití integrálu omezí, a proto dělíme prostor za překážkou podle druhu výpočtu na tři oblasti (Obr. 5). Pro náš účel používáme Fresnelovu difrakci, která je méně omezující nežli Fraunhoferova.



Obr. 5: Fresnelova a Fraunhoferova zóna. Fraunhoferův ohyb je znázorněn čárkovaně.

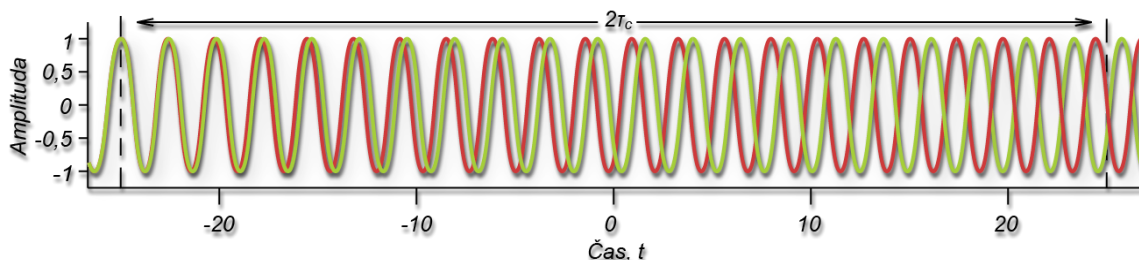
1.4 Koherence

Pro mnohé optické metody se vyžaduje kvalitní a stálý zdroj záření. S běžným světlem vyzařovaným sluncem nebo žárovkou pozorujeme interferenci velmi zřídka. Kvalitu zdroje pro interferometrii, holografii, ale i pro jiné měřicí optické metody určuje parametr, který označujeme jako koherence záření. Koherentní zdroj má stálou frekvenci záření a rozdíl fází vyzařovaných paprsků se nemění. Koherenci dělíme na koherenci časovou a prostorovou. [7]

1.4.1 Časová koherence

Časová koherence je míra průměrné korelace mezi vlnou a vlastním zpožděním τ , v časovém období. Časová koherence nám říká, jak moc je zdroj světla monochromatický. Tedy jak moc vlna interferuje sama se sebou v čase.

Zpoždění, po kterou fáze nebo amplituda roste do značné velikosti, nazýváme koherentní čas T_c . Při $T = 0$ je stupeň koherence ideální a výrazně klesá zpoždění T_c . Zpoždění se projevuje takzvanými zázněji. Jejich vzdálenost můžeme označit jako koherenční délku L , která vyjadřuje schopnost zdroje generovat stacionární záření se stálou fází ve sledovaném bodě. [7]



Obr. 6: Časová koherence

1.4.2 Prostorová koherence

Prostorovou koherenci lze vyjádřit pomocí tzv. koherenční šířky. Koherenční šířka je vzdálenost R na stínítku mezi osou svazku a místem, ve kterém dostaneme při interferenci paprsků šířících se od okraje monochromatického plošného zdroje minimum intenzity. Optická dráha těchto paprsků se liší o $\frac{\lambda}{2}$. Koherenční šířka je především funkcí příčné velikosti zdroje $2r$, vlnové délky λ a mění se se vzdáleností stínítka od zdroje a . Platí vztah:

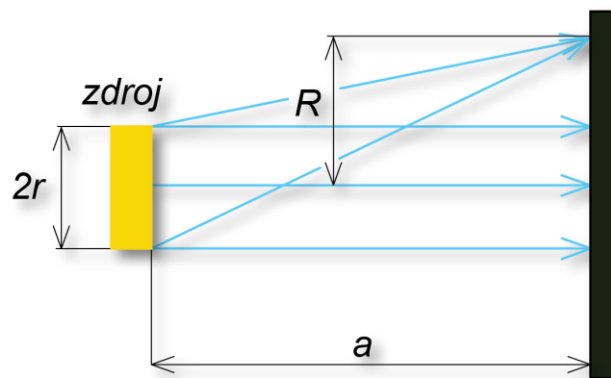
$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{a^2 + (R + r)^2} - \sqrt{a^2 + (R - r)^2} \quad (1.15)$$

Jelikož bývá velikost zdroje podstatně menší než vzdálenost stínítka od zdroje, lze daný vztah zjednodušit a dostaneme:

$$\frac{\lambda}{2} = \left[a + \frac{(R + r)^2}{2a} \right] - \left[a + \frac{(R - r)^2}{2a} \right] \quad (1.16)$$

Po úpravách lze vyjádřit koherenční šířku R ve tvaru:

$$R = a \frac{\lambda}{4r} \quad (1.17)$$

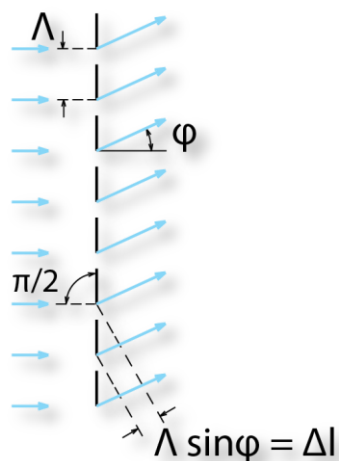


Obr. 7: Prostorová koherence

Z uvedeného rozboru je zřejmé, že při aplikaci zdroje záření s reálnou velikostí $2r$ lze osvětlovat ve vzdálenosti a od zdroje pouze objekty, které mají rozměr příčný k ose záření podstatně menší než $2R$, jinak se začne projevovat interference paprsků šířících se od okraje monochromatického zdroje, která může ovlivnit interferenci s případným dalším svazkem. Velké hodnoty koherenční šířky je možné dosáhnout především u laserů, kde velikost zdroje $2r$ je oproti jiným zdrojům záření zanedbatelná, a proto lze lasery považovat prakticky za bodové zdroje záření. [7]

2. Mřížky

Difrakční mřížky jsou difraktivní struktury s přísně periodickou modulací materiálových parametrů v prostředí.

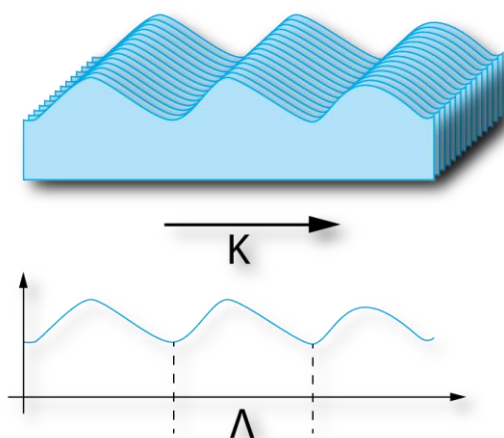


Obr. 8: Difrakční mřížka

Mřížkový vektor K má směr gradientu modulace a velikost:

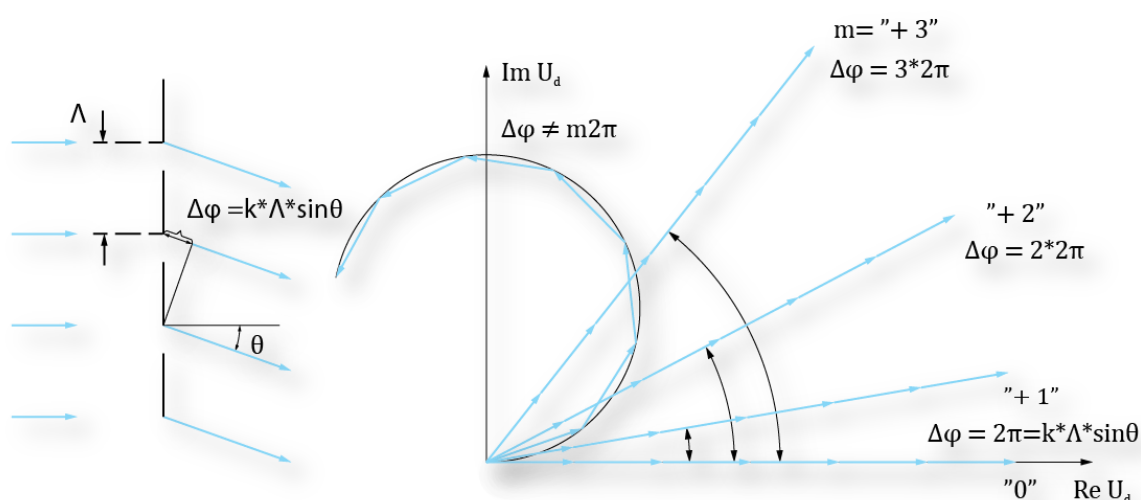
$$|K| = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.18)$$

Periodicita mřížek se může nacházet ve směrech nezávislých vektorů K . Spektrum mřížky je rozloženo v tolika směrech, v kolika je periodicita. V případě holografických mřížek se jedná o jednodimenzionální kvaziperiodické mřížky (Obr. 9). [6]



Obr. 9: Jednodimenzionální kvaziperiodická fázová mřížka

Difrakční proces na mřížce lze vyjádřit jako výsledek konstruktivní interference jednotlivých příspěvků vznikajících v prostoru difrakcí od jednotlivých period mřížky z povrchu i objemu. Vícenásobnost příspěvků a jejich konstruktivní superpozice se projevuje přerozdělením energie zejména do tzv. difrakčních řádů. Pro jejich vznik je zásadní fázový synchronismus úhlový (Obr. 10), který vyžaduje konstruktivní superpozici příspěvků mezi jednotlivými periodami mřížky. [6]



Obr. 10: Úhlový fázový synchronismus. V daném směru dochází k načítání příspěvků jednotlivých period.

Fázový synchronismus popisuje mřížková rovnice:

$$\Lambda \sin \varphi_k = m \lambda, \quad (1.19)$$

kde φ_k jsou úhly difrakce, při nichž je intenzita difraktovaného světla maximální pro danou délku λ . Proto různým vlnovým délkám vycházejí různé úhly difrakce, což podmiňuje funkci mřížky jako disperzního elementu. Číslo m je celé číslo a jedná se o řád spektra. Mřížková rovnice určuje pouze úhly a neurčuje účinnost spektra různých řádů. Ta se řeší pomocí výpočtu členů Fourierovi řady. Pokud chceme uvažovat intenzitu v různých řádech difrakce, musíme uvážit difrakci na každém z vrypů.

2.1 Tenká mřížka

Dají se dělit na amplitudové a fázové. Amplitudové mřížky modulují propustnost světla a mají tedy vysoké ztráty. Fázové mřížky modulují index lomu. Vlnění u nich prochází s fázovým posunem skrze celou mřížku. Mají nižší ztráty než amplitudové mřížky a tedy i vyšší účinnost difrakce.

Existují tenké a objemové mřížky. Posouzení objemovosti provádí Kleinův faktor:

$$Q = 2\pi \frac{\lambda d}{n_0 \Lambda^2} = \frac{K^2 d}{k}. \quad (1.1)$$

Při $Q < 1$ se jedná o tenkou mřížku. Při $Q > 10$ se jedná o objemovou mřížku a vlna interaguje s více periodami.

2.1.1 Tenká amplitudová mřížka

Propustnost harmonické amplitudové mřížky je dána vztahem:

$$t(x) = t_0 + \Delta t \cos Kx, \quad (3.1)$$

kde t_0 je průměrná amplitudová propustnost, Δt je amplituda prostorové variace $t(x)$ a $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$, kde Λ je průměrná perioda mezi vrypy na mřížce. Maximální amplituda v každém ze dvou difrakčních řádů je čtvrtina dopadající vlny. [1] Maximální účinnost difrakce v prvním řádu je:

$$\eta_{max} = 0,0625 \quad (3.2)$$

2.1.2 Tenká fázová mřížka

Je-li fázový posuv tvořen záznamovým médiem, je přímo úměrný intenzitě v interferenčním vzorci. Výsledný záznam můžeme považovat za tenkou fázovou mřížku s komplexní amplitudovou propustností:

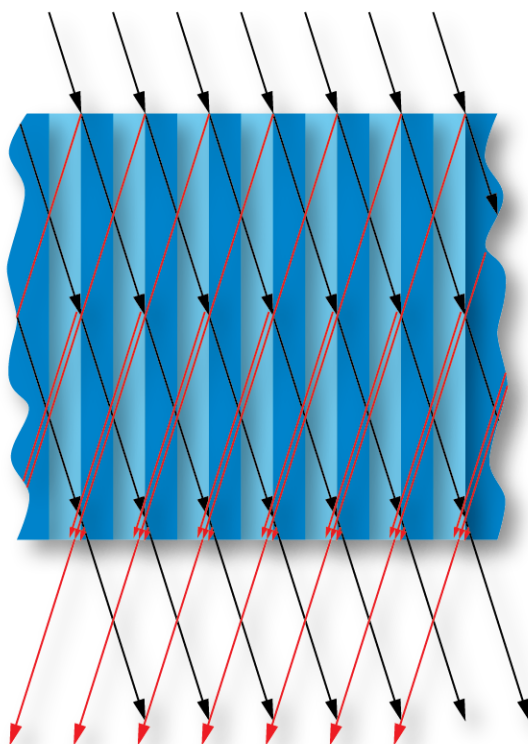
$$t(x) = \exp(-\theta_0) \exp[-i\Delta\theta \cos(Kx)], \quad (3.3)$$

kde θ_0 je konstantní fázový činitel a $\Delta\theta$ je amplituda fázové variace. Amplituda difraktuje do prvního řádu se zvyšující se fázovou modulací. Maximální účinnost difrakce v prvním řádu je:

$$\eta_{max} = 0,39 \quad (3.4)$$

2.2 Objemové mřížky

Objemové mřížky mají nezanedbatelnou tloušťku. Kleinův faktor je $Q > 10$. Difrakční příspěvky se načítají nejen z plochy, ale i z objemu difrakční struktury a dochází tak k vazbě mezi řády (Obr. 11). Aby se příspěvky co nejvíce načetly (podmínka fázového synchronismu), musí být splněna tzv. Braggova podmínka, která spolu jednoznačně svazuje směry dopadající a difraktované vlny. Splnění této podmínky si lze představit jako odraz světla od rovnoběžných odrazných rovin, přičemž od každé roviny se odrazí pouze část světla a zbytek projde.



Obr. 11: Fázový objemový synchronismus braggovský pro $Q > 10$

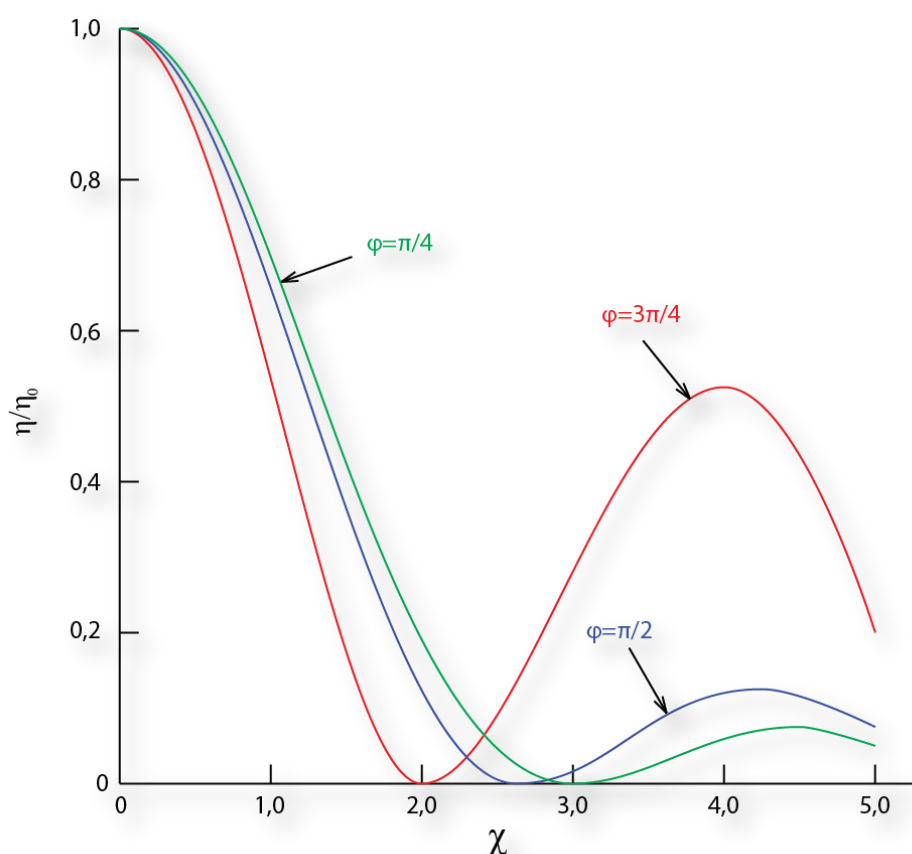
2.2.1 Objemové transmisní mřížky

U objemové fázové mřížky o tloušťce d s rovinnou mřížkou směřující kolmo k jejímu povrchu budeme předpokládat, že index lomu se mění sinusově s amplitudou Δn o průměrnou hodnotu n_0 . Účinnost difrakce pod Braggovým úhlem bude η_b :

$$\eta_b = \sin^2 \Phi, \quad (3.5)$$

kde $\Phi = \pi \Delta n \frac{d}{\lambda} \cos \theta_b$ je znám jako parametr modulace. Difrakční účinnost stoupá z počátku zároveň s růstem Φ , dokud $\Phi = \frac{\pi}{2}$, $\eta_b = 1$. Za tímto bodem bude účinnost difrakce klesat. Maximální účinnost difrakce v prvním řádu je:

$$\eta_{max} = 0,037 \quad (3.6)$$



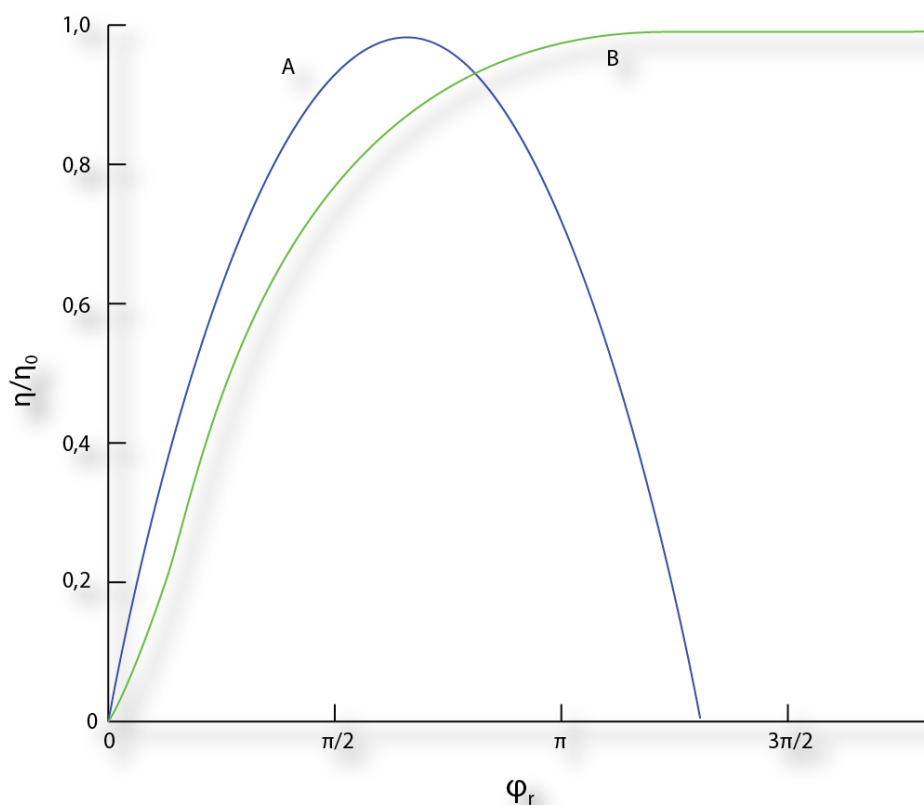
Obr. 12: Selektivita úhlová a selektivita vlnové délky objemové transmisní fázové mřížky a její vliv na normalizovanou difrakční účinnost. Parametr χ je měřítkem odchýlení od Braggovy podmínky, křivky pro tři různé hodnoty modulačního parametru Φ .

2.2.2 Objemové reflexní mřížky

Difrakční účinnost objemové reflexní mřížky je pod Braggovým úhlem dána vztahem:

$$\eta_b = \tan^2 \phi_r, \quad (3.7)$$

kde $\phi_r = \pi \Delta n \frac{d}{\lambda} \cos \theta_b$ a Δn je amplituda kolísání indexu lomu. S růstem hodnoty ϕ_r nepřetržitě roste difrakční účinnost prvního řádu až k limitní hodnotě 1.



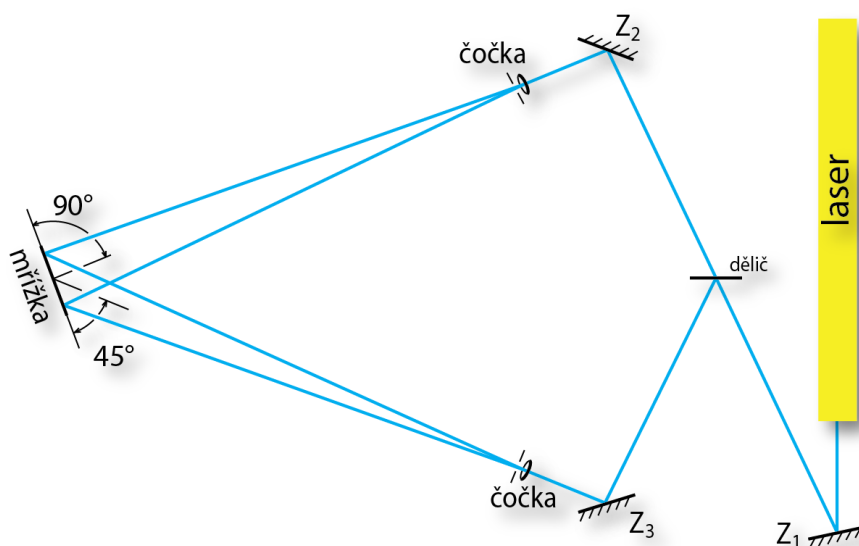
Obr. 13: Maximální difrakční účinnost objemové fázové transmisní (A) a reflexní (B) mřížky při Braggově úhlu jako funkce modulačního parametru Φ .

2.3 Vytvoření harmonické difrakční mřížky

Harmonickou difrakční mřížku lze vytvořit pomocí interference dvou koherentních svazků (Obr. 14). V zásadě se mohou použít rovnoběžné nebo rozbíhavé svazky paprsků. Interferenční obrazec tvoří proužky s danou periodou a je zaznamenán do fotografické emulze nanesené na skleněné

podložce. Periodu interferenčních proužků (1.20) určíme z použité vlnové délky λ a vzájemného úhlu α .

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \quad (1.20)$$



Obr. 14: Vytvoření difrakční mřížky pomocí dvou koherentních svazků.

Difrakční mřížka se často používá ve spektrometrech, protože rozkládá bílé světlo na jednotlivé spektrální složky podle vlnových délek. Difrakční obrazec má velmi úzká interferenční minima a maxima. Čím je perioda mřížky nižší, tím jsou interferenční minima a maxima od sebe více vzdáleny.

3. Holografie

Slovo hologram je složeno z řeckých slov holos (celkový) a gramma (zpráva). Teoretické základy holografie položil v roce 1948 Dennis Gabor. V roce 1960 díky vynalezení laseru, který dodal dostatečně koherentní a bodové světlo, se mohla holografie plně rozvinout. Roku 1964 byl na Michiganské universitě vytvořen první trojrozměrný záznam zobrazující model vláčku (Obr. 15). [8]



Obr. 15: První trojrozměrný hologram. Autoři: Leith a Upatnieks.

Holografie je fotografický proces, který se využívá především pro tvorbu 3D obrazů a jejich následnou rekonstrukci. Obraz se zaznamenává pomocí laseru emitující dostatečně koherentní svazek světla na světlocitlivý materiál, který je chemicky podobný běžné fotografii. [9]

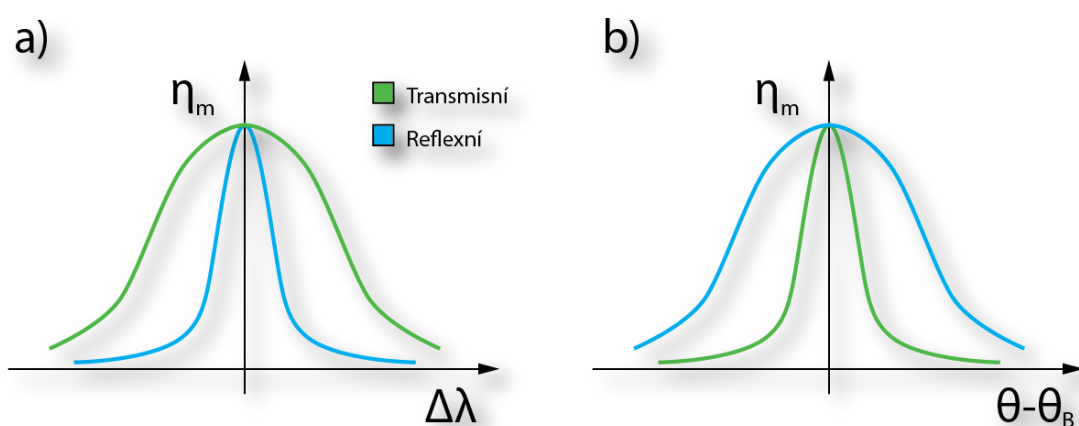
Vlastní hologram vzniká interferencí dvou svazků světelných vln. První paprsek nazýváme referenční a dopadá přímo na fotografický film. Druhý paprsek je směřován na zaznamenávaný objekt a odráží se od něj. Odražený paprsek, který nazýváme objektový, dopadá na holografický film, kde interferuje s referenčním paprskem. [10]

Pro rekonstrukci hologramu je potřeba osvětit vyvolanou fotografickou desku referenčním paprskem o shodné vlnové délce a pod stejným úhlem, jaký byl použit při záznamu. Oproti klasické fotografii je hologram schopen zaznamenat nejen intenzitu, ale i fázi vlny. [9]

3.1 Nejběžnější typy hologramů

Hologram je difrakční mřížka, která má kvaziperiodickou strukturou. V praxi se setkáváme nejčastěji s objemovými hologramy, které se dělí na transmisní a reflexní. Ty se liší rozdílnou orientací period v hologramu (Obr. 17).

Záznamové médium u objemových hologramů dosahuje tloušťky až několik mm a perioda proužků, která je řádově menší, dosahuje tloušťky několika mikrometrů. Dochází u nich k difrakci až se 100% odraženého světla, což způsobuje velmi účinnou rekonstrukci obrazu.

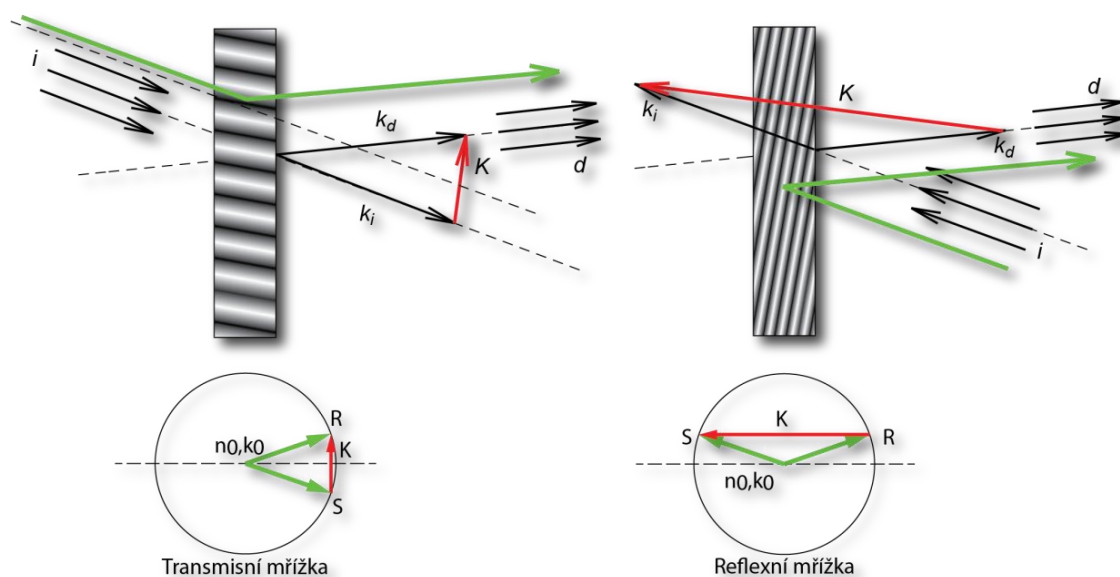


Obr. 16: Účinnost difrakce vlnových délek (a) a účinnost úhlů dopadu rekonstrukční vlny (b) reflexního a transmisního hologramu.

3.1.1 Transmisní hologramy

Transmisní hologram má typické vlastnosti transmisní mřížky (viz stranu 24). Difraktovaná vlna se nachází v opačném poloprostoru než vlna rekonstrukční. Mřížkový vektor je malý a spíše paralelní s rovinou mřížky (Obr. 17). Má vyšší nároky na úhly dopadu (Obr. 16b). Při rekonstrukci v bílém světle difragují všechny vlnové délky, které se překrývají a vytvářejí duhu. Z těchto důvodů není možné transmisní hologram rekonstruovat pomocí bílého světla.

Pro rekonstrukci je nutné nasvítit hologram svazkem paprsků laseru pod totožným úhlem a vlnovou délkou, kterou měla referenční vlna použitá při záznamu hologramu.



Obr. 17: Difrakce na objemové mřížce.

3.1.2 Reflexní hologramy

Reflexní hologram má typické vlastnosti reflexní mřížky. Difraktovaná vlna se nachází ve stejném poloprostoru jako vlna rekonstrukční. Mřížkový vektor je velký a spíše kolmý na rovinu mřížky. Reflexní hologramy mají na rozdíl od transmisních hologramů ostrý vrchol grafu účinnosti difrakce vlnové délky (Obr. 16), a proto difraguje pouze jedna vlnová délka a ostatní mají zanedbatelnou účinnost. Navíc nejsou tak citlivé na změnu úhlu dopadu rekonstrukční vlny. Reflexní hologram lze díky vysoké selektivitě vůči změně vlnové délky rekonstrukční vlny rekonstruovat v bílém světle.

3.1.3 Duhové hologramy

Jedná se o speciální typ transmisního hologramu, který rekonstruuje jasný a ostrý obraz při osvětlení bílým světlem. Samotný vznik je možno rozdělit na dvě fáze. První je pořízení již známého transmisního hologramu klasickým způsobem. Když je poté osvětlen originální referenční vlnou, dojde k rekonstrukci reálného obrazu původního objektu. Poté se do scény mezi destičku a obraz umístí stínítko s horizontální štěrbinou, skrz kterou dojde k nahrání nového hologramu (jako předloha slouží právě obraz prvního hologramu). Získaný obraz je pro pozorovatele viditelný, pokud si při prohlížení

najde vhodnou pozici, reprezentující umístění stínítka během nahrávání. Navíc je obraz velmi ostrý a jasný. Při pohybu hlavou do stran je možné pozorovat poměrně širokou horizontální paralaxu. Ovšem při pohybu hlavou nahoru či dolů obraz zmizí, jelikož vertikální paralaxa je eliminována. Nasvícení může být pomocí referenčních paprsků, kterými byl hologram vytvářen. Při osvětlení klasickým bílým světlem dojde k rozložení obrazu na vertikální ploše za vytvoření spojitého spektra. Pro pozorovatele stačí, aby se očima dostal do jakéhokoliv místa tohoto spektra. Poté lze spatřit trojrozměrný ostrý obraz v korespondující barvě.

3.2 Záznamová media

Záznamových médií existuje celá řada, avšak pro v holografii využíváme pouze pár z nich. Nejčastěji využívaným holografickým záznamovým médiem je stříbrohalidová emulze. Výrazně méně se setkáváme s použitím dichromované želatiny. Fotopolymery se využívají jen výjimečně. [1]

Důležitými vlastnostmi záznamových médií jsou nároky na vysoké prostorové rozlišení s plochou křivkou odezvy na různé prostorové frekvence. Tím se podaří zachytit celý objekt i s jemnými detaily. Musí existovat lineární vztah mezi expozicí a amplitudou rekonstruované vlny pro dosažení maximální věrnosti rekonstrukce obrazu. Materiál by měl vykazovat vysokou optickou kvalitu, být bezeztrátový, na změny okolního prostředí by měl reagovat jen minimálně a měl by být dostatečně citlivý i při nízkých intenzitách.

Holografické stříbrohalidové emulze (SHE) jsou speciálně připravované fotografické emulze s velmi vysokým rozlišením a záznam v nich je buď objemový absorpční, anebo objemový fázový. Je složena z krystalů halogenidu stříbrného dispergované v želatině. Vlastnosti hologramů zaznamenaných v SHE ovlivňuje nejenom složení a vlastnosti SHE, ale také zpracovatelský proces, vyvolávání a bělení, které je potřebné s každým materiálem vyladit. Vzhledem k použití v holografii se vyžaduje po emulsi co nejvyšší rozlišení. Emulze pro obyčejnou fotografii je střední velikost zrna 1 až 2 μm , pro holografii je požadavek na velikost zrna o jeden až dva řády vyšší. Pro reflexní hologramy

je nutné, aby rozlišovací schopnost holografického média přesahovala 6000 čar/mm, obyčejné fotografické emulze dosahují rozlišení pouze 200 čar/mm. [1]

Expozicí materiálu dochází účinkem fotonu na emulzi ke vzniku fotoelektronu, který způsobuje vznik kovového stříbra Ag -tzv. latentního obrazu. Osvícená zrna se v zásaditém roztoku vývojky redukuje Ag a vzniká amplitudový záznam. Kvůli velké absorpci a malé difrakční účinnosti se tento záznam nepoužívá, proto následuje proces bělení, v kterém dochází k převodu amplitudového záznamu na fázový. V bělící lázni se stříbro zpětně rehalogenizuje. To znamená, že z kovového stříbra vzniká průhledná sůl. Výsledkem jsou různé koncentrace dielektrických částic, které způsobují diferenciální změny indexu lomu želatiny. [1]

SHE patří k nejcitlivějším známým materiálům, je použitelná na široké spektrum barev s dobrými difrakčními vlastnostmi a má vysokou rozlišovací schopnost, přesahující 5000 čar/mm. Naproti tomu ale obsahuje i vlastní vysoký šum, nízkou účinnost v krátkých vlnových délkách a vyžaduje zdlouhavý mokré vyvolávací proces.

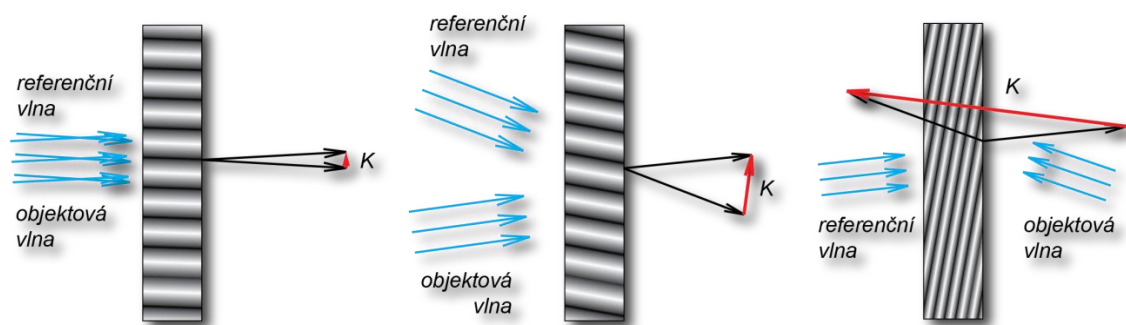
Dichromovaná želatina se musí vyvolávat mokřým procesem a je málo citlivá na významných laserových čarách. Její výhodou je, že netrpí šumem. [1]

Fotopolymery neměli donedávna dostatečně velkou citlivost a měli minimální odezvu. V poslední době se ale tyto problémy částečně podařilo odstranit. Jejich obrovská výhoda je, že není potřeba vyvolávat mokrou cestou.

3.3 Záznam hologramů

Záznam hologramů provádíme tak, že rozdělíme paprsek na referenční a objektovou vlnu. Referenční vlna dopadá přímo na holografickou desku. Objektová vlna dopadá na zaznamenávaný objekt, od kterého se odráží a dopadá na holografickou desku, kde interferuje s referenční vlnou.

Existují tři základní schémata, jak se dají hologramy zhotovit.

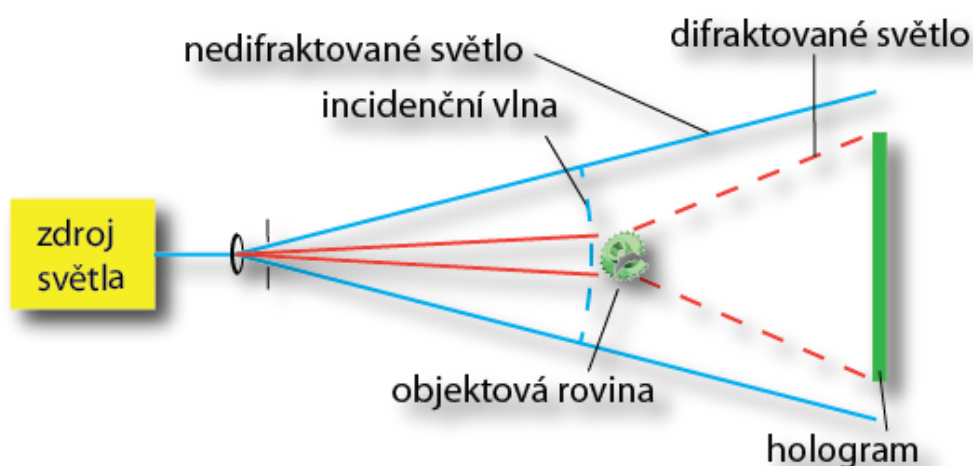


Obr. 18: Nejběžnější způsoby záznamu hologramů. Osový (vlevo), mimoosový (uprostřed) a Děnisjukův hologram (vpravo).

Osový hologram

Často je považován za zakladatele holografie Dennis Gabor (úplné začátky holografie však lze vypožorovat v pracích Gabriela Lippmana). Gabor ukázal, že osvětlením zaznamenaného interferenčního obrazce jednou ze dvou interferujících vln lze rekonstruovat druhou vlnu. Toto rekonstruované vlnové pole se skládá z amplitudového a fázového rozložení, ne pouze z intenzity. Gabor neměl zdroj světla poskytující světlo s dostatečnou koherencí. Nezbylo mu tedy, než vytvářet tzv. osově hologramy, kde se objektová a referenční vlna šíří stejným směrem kolmo k hologramu. Jako světelný zdroj využíval obloukovou rtuťovou lampu. [9]

Jedná se o nejjednodušší hologram zaznamenávaný jednosvazkovou metodou. Svazek projde hologramem, odrazí se od objektu a interferuje s původní referenční vlnou (Obr. 19).

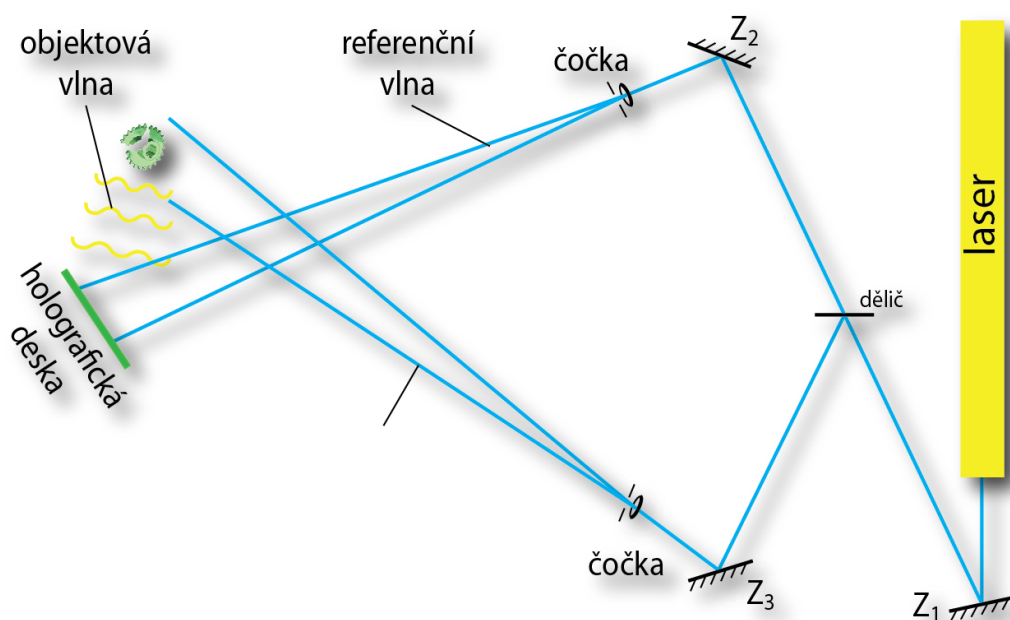


Obr. 19: Schéma záznamu osového hologramu.

Schéma záznamu transmisního mimosového hologramu

Leith a Upatnieks navrhli a demonstrovali modifikaci originálního Gaborova způsobu záznamu hologramu. Vyřešili problém dvojího obrazu a významně rozšířili možnosti použití holografie. Rozpoznali možnosti holografické výroby a pomocí vylepšené Gaborovi techniky záznamu vytvořili první hologram, který obsahoval 3D obraz objektu. Hologramy mají vysoký jas a hloubku. [9][10]

Jedná se o dvousvazkovou metodu, kdy svazky dopadají na záznamové médium pod relativně velkým úhlem v porovnání s osovým hologramem. Referenční vlna dopadá přímo na holografické médium, kde interferuje s objektovou vlnou, odraženou od zaznamenávaného objektu.



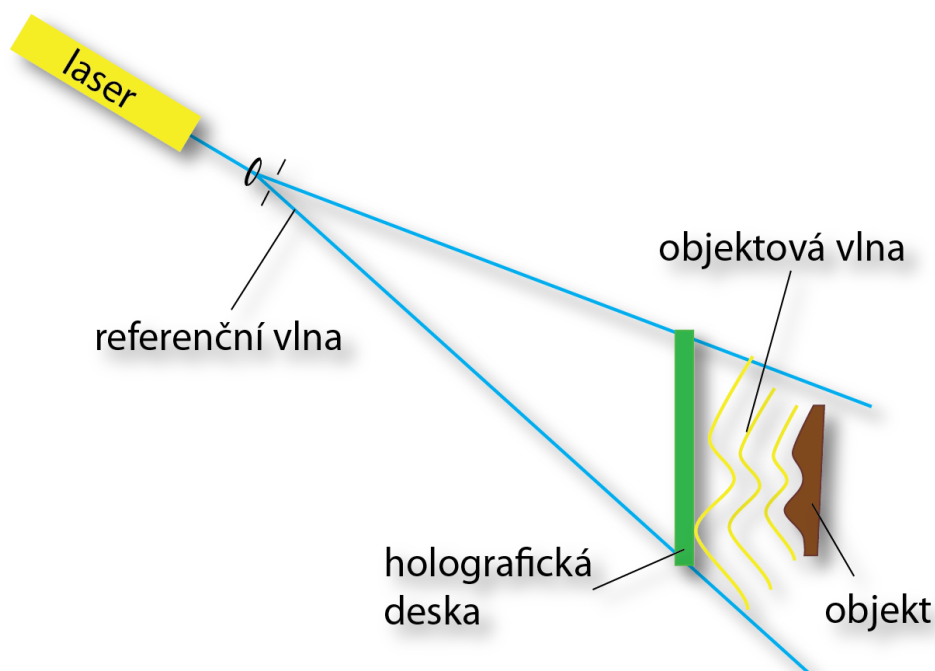
Obr. 20: Schéma záznamu mimosového transmisního hologramu.

Děnisjukův hologram

Jurij Nikolajevič Děnisjuk z Ruska použil Nobelovou cenou ověřenou práci Gabriela Lippmana, kterou zdokonalil. Děnisjuk jako první vyrobil reflexní hologram, který může být rekonstruován pomocí světla z obyčejné žárovky. Na začátku sedmdesátých let vynalezl proceduru reflexního hologramu zaznamenávaného na průhledné fotografické desky. Děnisjukovo schéma je nejjednodušší z holografických schémat. Přesto je možné pomocí něj

zaznamenávat hologramy o velmi vysoké kvalitě. Před ním bylo možné zaznamenávat hologramy pouze pomocí schématu podle Leitha a Upatniekse (mimoosový), kdy bylo potřeba mít laser nejen pro vlastní vytvoření hologramu, ale i pro jeho rekonstrukci. Aby mohl být záznam rekonstruován v bílém světle, Děnisjuk navrhl exponovat fotografickou desku a zaznamenávaný objekt stejným laserovým paprskem. Vynalezl proto průhledné fotografické desky s velmi vysokým rozlišením. [11]

Jedná se o nejjednodušší hologram, který je zaznamenávaný jednosvazkovou metodou. Svazek projde hologramem, odrazí se od objektu a interferuje s původní referenční vlnou (Obr. 21). Jeho nevýhoda spočívá v nemožnosti nastavení poměrů intenzity jednotlivých svazků.

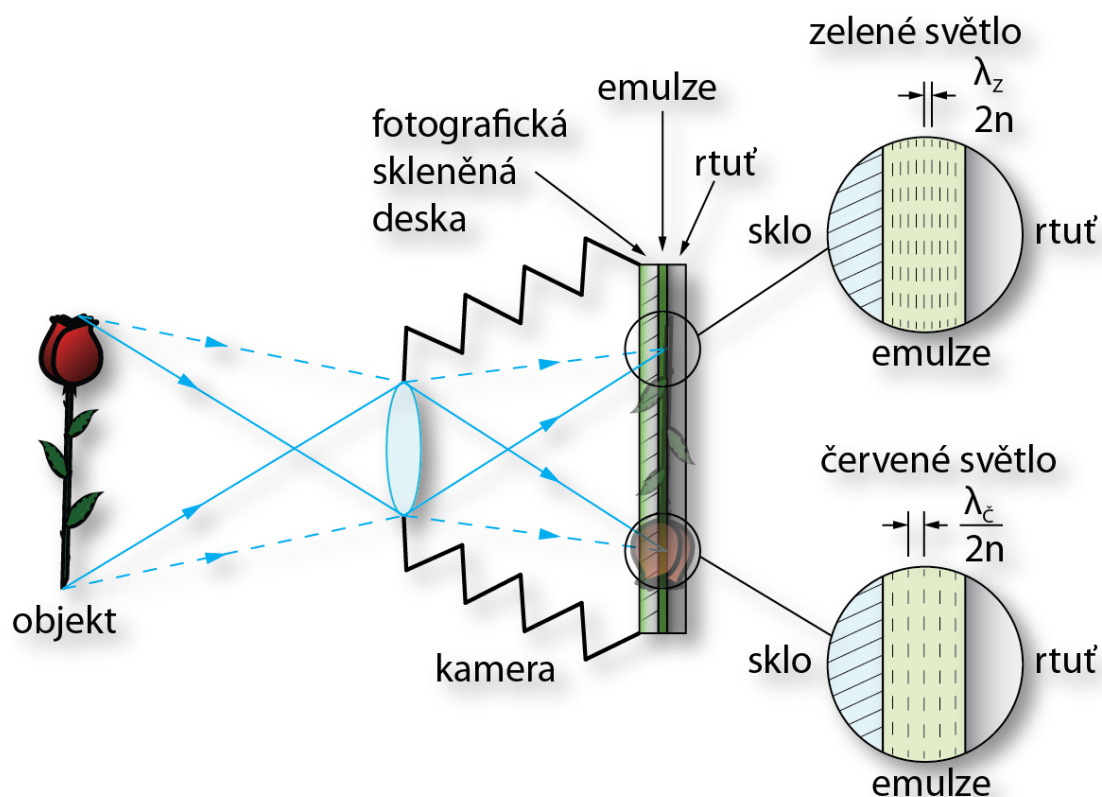


Obr. 21: Děnisjukovo schéma záznamu hologramu.

3.4 Lippmanova fotografie

V dnešní době je obrovská poptávka o techniky záznamu obrazu s co nejvěrnějším podáním barev. Po vynálezu černobílé fotografie v devatenáctém století, bylo mnoho zájmu najít způsob pro záznam přirozeně barevných fotografií. Poněkud obtížnou, ale velmi zajímavou interferenční fotografickou metodu vynalezl a předvedl v roce 1891 Gabriel Lippman. Pokud jde o podání

barev, Lippmanova fotografie byla jediná technika záznamu obrazu, která mohla zachytit celé barevné spektrum objektu nebo scény.



Obr. 22: Princip záznamu Lippmanovi fotografie.

Lippman byl schopen zaznamenat barvy jako stojaté vlnění v emulzi. Jeho technika záznamu je známa jako interferenční fotografie nebo interferenční barevná fotografie. Vymyslel první teorii záznamu monochromatického a polychromatického spektra. Z vědeckého pohledu byl jeho způsob výroby barevné fotografie velmi zajímavý. Vzhledem k náročnosti a časově dlouhé expozice nebyl příliš vhodný pro praktické využití. Zavedení do široké praxe také nepomohlo složité prohlížení fotografií, ani problém s jejich kopírováním. Avšak, přes sto let staré fotografie pořízené Lippmanem jsou velmi krásné a jejich barevná stálost vypovídá o vysoké archivační hodnotě. Gabriel Lippman byl v roce 1908 oceněn Nobelovou cenou v oblasti fotografie.

Princip Lippmanovi fotografie je znázorněn na Obr. 22. Z důvodu požadavku na vysoké rozlišovací schopnosti při záznamu, musí mít použitá fotografická emulze velmi jemná zrna a nízkou citlivost. Emulzní strana holografické desky

je ve styku se rtutí, která zajišťuje vysoce reflexní povrch. Expoziční světlo prochází skrze skleněnou desku s emulzí, zde se dostane do kontaktu se rtutí, která odráží světlo zpět do emulze. V emulzi interferuje expoziční světlo se svým vlastním odrazem. Stojaté vlnění, vzniklé interferencí vln, dává za vznik velmi jemné mřížce s pravidelnou periodou $\frac{\lambda}{2n}$ v celé emulzi (λ je vlnová délka světla a n je refraktivní index emulze). Tímto způsobem je uložena barevná informace. Čím větší je perioda mřížky, tím delší vlnová délka je zaznamenána. Toto je platné pouze pro monochromatické záznamy. Barevná fotografie je mnohem složitější.

Když se díváme na vyvolanou fotografii v bílém světle, různé části obrazu zobrazují různé barvy. Je to z důvodu rozdělení zaznamenané mřížky. Světlo je odráženo od mřížky a vytváří různé barvy odpovídající původním, které byly zaznamenány při expozici. Změnou úhlu osvitů bílým světlem a změnou pozice pozorovatele se barvy mění.

4. Experimentální část

V této kapitole práce se bude demonstrovat záznam, vyvolání a rekonstrukce hologramů. Převážně se zaměříme na reflexní hologramy, které jsou rekonstruovatelné v bílém světle. Nejdříve vytvoříme záznam transmisního mimoosového hologramu, a poté vytvoříme sérii záznamů hologramů reflexních. U nich začneme reflexním hologramem podle Dēnisjukova schématu za pomoci jednoho svazku paprsků. Následovat bude mimoosový hologram, kdy z důvodu potřeby získání reflexního hologramu, necháme dopadat referenční a objektovou vlnu z opačných stran holografické desky. Nakonec vytvoříme reflexní hologram kopírováním, kde jako master použijeme transmisní hologram, který byl vytvořen jako první.

4.1 Použité optické prvky a nástroje

Základní mechanickou komponentou celé holografické sestavy je mramorový optický stůl, který je odizolován od rušivých mechanických vlivů polystyrenovými deskami. Ty mají široké tlumící pásmo, čímž zabraňují přenosu vibrací.

Jako zdroj koherentního světla byl použit Nd³⁺: Yag laser o vlnové délce 532 nm s výkonem 100 mw. Přesný čas expozice zajišťovala programovatelná uzávěrka s nejmenším krokem 0,01 s.

Svazek vycházející z laseru byl v případě potřeby polarizačně rozdělen na děliči svazku. Ten je opatřen půlvlnovými lambda destičkami. Vstupní destička umožňuje plynulé nastavení intenzit v rozdělených svazcích a výstupní destičky nastavení jejich polarizací.

Každý svazek prochází prostorovým filtrem, za účelem rovnoměrného rozšíření průměru laserového paprsku a odfiltrování nechtěných frekvencí. Použit je mikroskopový objektiv se zvětšením 40x ve vzdálenosti 200 mm, což je dostačující pro rovnoměrné nasvícení zaznamenávaných objektů. Z důvodu zachování rovinné vlny byl za prostorový filtr vložen kolimační objektiv. Změnou vzdálenosti kolimačního objektivu od prostorového filtru byla určena poloha, kdy při pozorování přes dvojité zrcadlo, obsahoval pozorovaný obraz

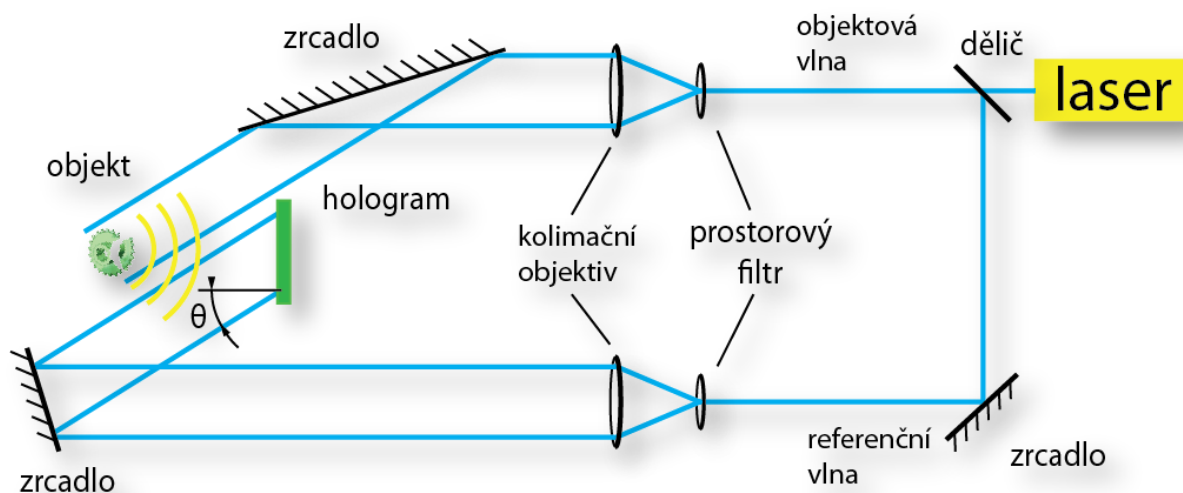
interferenčního jevu nejmenší počet interferenčních proužků a tím byla zajištěna rovinná vlna.

Pro měření hustoty výkonu paprsku byl používán přístroj Coherent Ultima LabMaster. Při měření byla každá neměřená větev přerušena neprůsvitnou překážkou, aby neovlivnila získávané hodnoty. Pokud bylo nutné snížit intenzitu svazku v jedné z větví a rozsah děliče svazku byl nedostačující, byl použit filtr FW1-2A, osazený neutrálními absorpčními filtry světelného toku. Pro změnu směru svazku byla použita optická zrcadla.

V celém experimentu jsou použity vysoce citlivé stříbrohalidové holografické desky PFG-03C, které mají výrobcem doporučenou expoziční energii 2500-3000 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (viz stranu 50).

4.1 Záznam mimosového transmisního hologramu

Bylo navrženo schéma pro záznam transmisního hologramu mimosovou metodou (*Obr. 23*). Při sestavování schématu bylo dbáno na podmínku časové koherence. Délky objektové a referenční vlny se proto shodují. Za laserem je umístěna časově programovatelná uzávěrka. Vyzařovaný svazek světla byl naveden k děliči. V objektové i referenční větvi je vložen prostorový filtr, pro odfiltrování nechtěných frekvencí a za něj kolimační objektiv pro zachování rovinné vlny. Objektovou vlnu odraženou od zaznamenávaného objektu, jsme nechali dopadat kolmo na holografickou desku a referenční vlnu pod úhlem 30° . Vlny dopadají na holografickou desku ze stejné poloroviny, tím je zaručen vznik transmisního hologramu. Vzdálenost mezi snímaným objektem a holografickou deskou jsme volili co nejmenší, ale tak, aby nedocházelo k stínovým efektům.



Obr. 23: Záznam transmisního hologramu mimoosovou metodou.

Po sestavení optické aparatury, bylo nutné nastavit energetické poměry objektového a referenčního svazku signálu. Nejvyšší kontrast je dosažen při poměru 1:1. Pomocí detektoru optického výkonu jsme změřili hustotu výkonu referenčního paprsku dopadajícího na holografickou desku. Poté byla změřena intenzita odraženého světla od zaznamenávaného předmětu v objektové vlně. Měření bylo prováděno vždy kolmo k svazku v oblasti před holografickou deskou a při zatemnění celé laboratoře. Protože referenční svazek dopadal na holografickou desku pod úhlem 30° , bylo třeba dopočítat efektivní hodnotu hustoty výkonu pomocí vzorce:

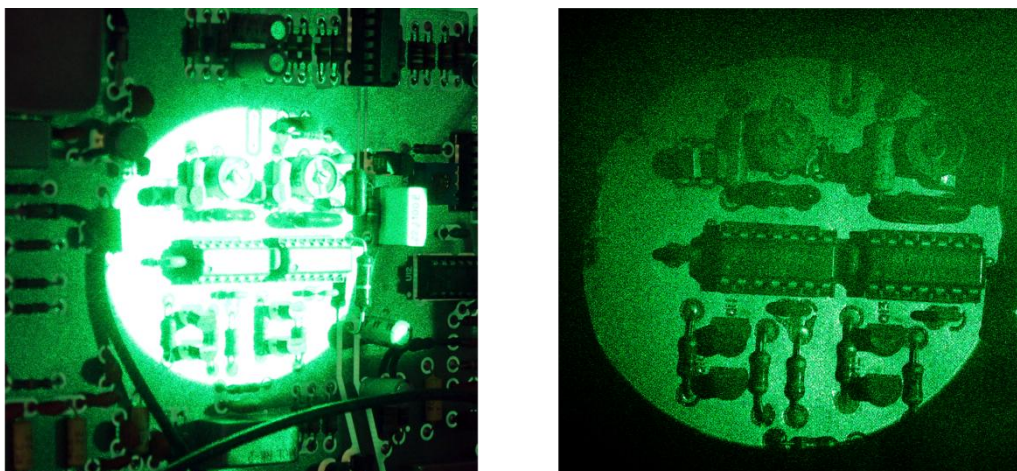
$$I_{ef} = I_r \cos \theta, \quad (4.1)$$

kde I_r je hustota výkonu měřena kolmo k referenčnímu svazku a θ je úhel dopadu referenčního svazku na holografické médium. Celý výpočet času expozice je proveden v tabulce (*Tabulka 1*):

Tabulka 1: Výpočet času expozice

Měření energie paprsků			
	Označení	Naměřená hodnota	Jednotka
Objektový	I_o	9,7	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Referenční	I_r	12,2	
Referenční po výpočtu (30°)	I_{ef}	10,6	
Měřený celkový součet paprsků	I_c	20,3	
Poměr paprsků			
$\frac{I_o}{I_{ef}} = \frac{9,7}{10,6} = 0,91$			-
Výpočet času expozice			
$t = \frac{E}{I_c} = \frac{3000}{20,3} = 147,7$			s
Skutečný expoziční čas		148	

Expoziční čas vyšel přibližně 147,7 sekundy. Automatická závěrka byla proto nastavena na 148 sekund a před vlastní expozicí byla odzkoušena její funkčnost. Připravili jsme chemikálie pro vyvolávací proces. Holografické desky PFG-03C jsou citlivé v celém viditelném spektru, proto nemohlo být použito žádné osvětlení. Po vyjmutí holografické desky z ochranného obalu, byla označena přední strana desky, na které je nanesena světlocitlivá emulze. Deska je umístěna v držáku tak, aby byla strana s emulzí vystavena objektové vlně. Poté byla spuštěna expozice. Před vlastní expozicí a během ní byl v laboratoři naprostý klid. Zaznamenaný hologram není ovlivněn vibracemi.

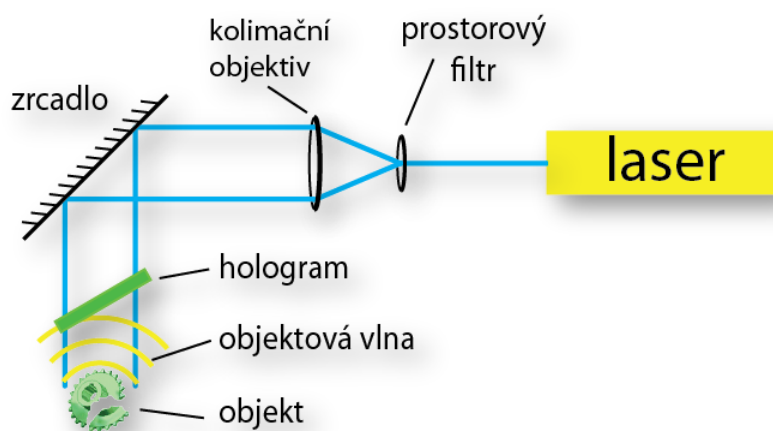


Obr. 24: Snímaný objekt (vlevo) a jeho laserem rekonstruovaný transmisní hologram (vpravo).

Při rekonstrukci laserem má vysoký kontrast a široké pozorovací úhly. Dokonce byly velmi dobře čitelné označení na paměťových čípech zaznamenaného objektu. Tento transmisní hologram byl použit při kopírování reflexního hologramu z transmisního masteru. Při pokusu o rekonstrukci v bílém světle se obrazy jednotlivých vlnových délek překrývaly a obraz byl duhový. Takto rekonstruovat transmisní hologram tedy nemá smysl.

4.2 Záznam reflexního hologramu Děnisjukovou metodou

Bylo navrženo záznamové schéma reflexního hologramu (Obr. 25). Protože je jednosvazkový, jedná se o jeden z nejjednodušších hologramů, který lze vytvořit. Za laserem je umístěna programovatelná časová uzávěrka, následuje prostorový filtr a kolimační objektiv. Svazek prochází záznamovým médiem, až na objekt, zde se deformuje a jeho odražená část se vrací zpět na médium, kde interferuje s dopadající vlnou.

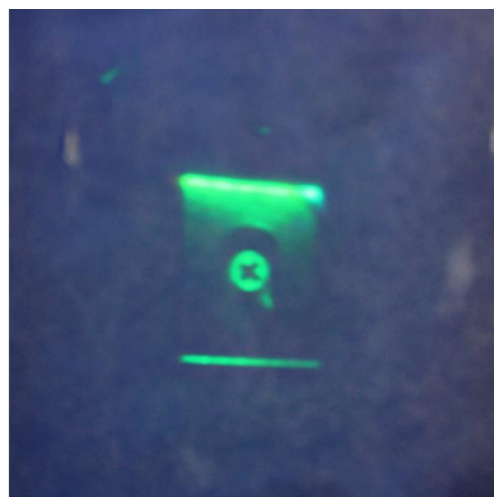
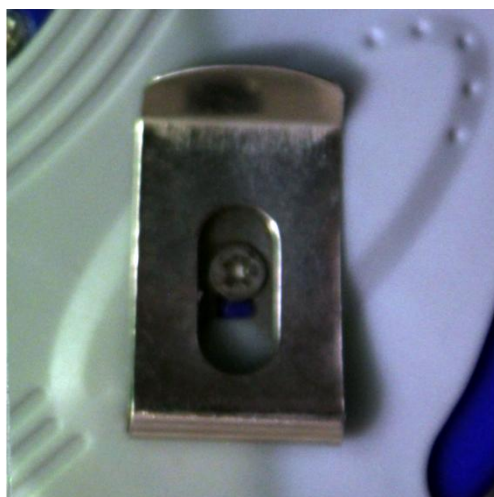


Obr. 25: Záznam reflexního hologramu pomocí jedné větve. Při tomto způsobu záznamu interferuje referenční svazek se světlem odraženým od zaznamenávaného předmětu.

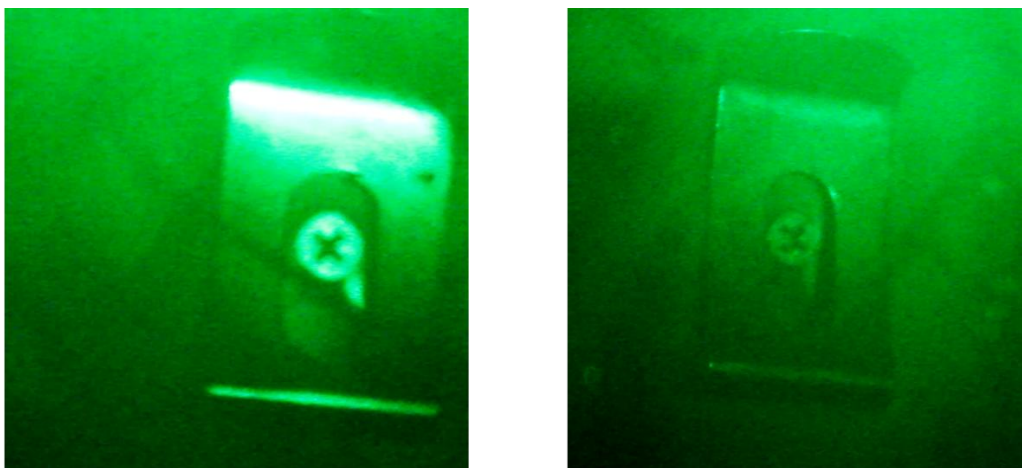
Pomocí detektoru optického výkonu byla změřena hustota výkonu paprsku dopadajícího přímo na holografickou desku, tak i odraženého světla od zaznamenávaného předmětu. Protože referenční svazek dopadal na holografickou desku pod úhlem 35° , bylo třeba dopočítat efektivní hodnotu hustoty výkonu. Celkový čas expozice je vypočítán v tabulce (Tabulka 2):

Tabulka 2: Výpočet času expozice

Měření energie paprsků			
	Označení	Naměřená hodnota	Jednotka
Objektový	I_o	39,2	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Referenční	I_r	80,5	
Referenční po výpočtu (35°)	I_{ef}	65,9	
Měřený celkový součet paprsků	I_c	105,1	
Poměr paprsků			
$\frac{I_o}{I_{ef}} = \frac{39,2}{65,9} = 0,6$			-
Výpočet času expozice			
$t = \frac{E}{I_c} = \frac{2750}{105,1} = 26,1$			s
Skutečný expoziční čas		26	



Obr. 26: Snímaný objekt (vlevo) a v bílém světle rekonstruovaný reflexní hologram (vpravo).

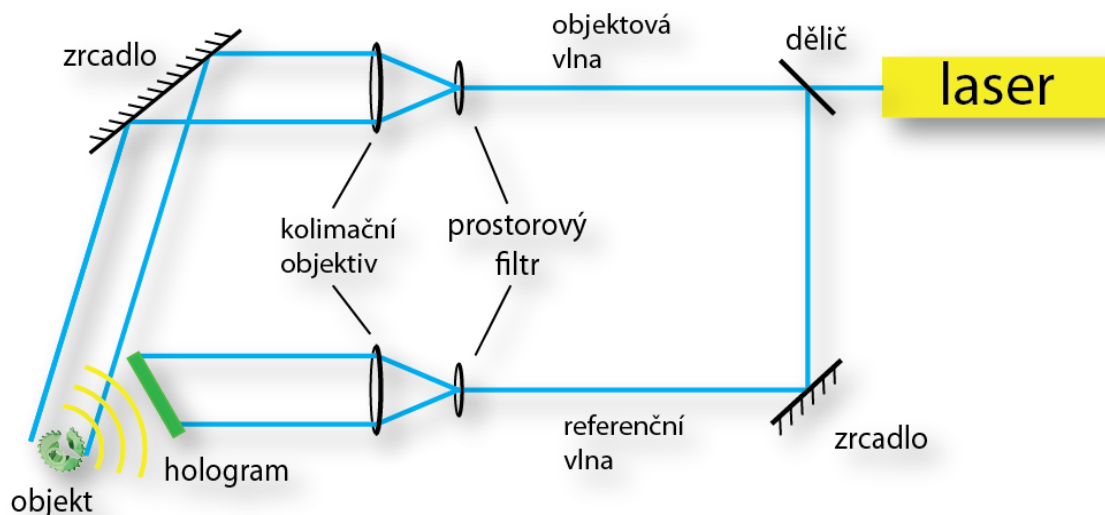


Obr. 27: Rekonstruované reflexní hologramy pomocí referenční vlny laseru. Fotografováno z různých úhlů.

Reflexní hologram zaznamenaný Děnisjukovou metodou je na obrázku (Obr. 26). Vysoce odrazivá kovová plocha se rekonstruuje velmi ostře a to i v bílém světle. Okolní reliéf je viditelný jen při důkladném pozorování hologramu při plynulém otáčení. Hologram má i při poměru paprsků 0,56, který vzhledem k způsobu záznamu nelze vylepšit, vysoký kontrast.

4.3 Záznam reflexního hologramu mimoosovou metodou

Při sestavování schématu (Obr. 28) bylo dbáno na podmínku časové koherence. Délky objektové a referenční vlny se proto shodují. Za laserem je umístěna časová programovatelná uzávěrka. Vyzařovaný svazek světla byl naveden k děliči svazků s proměnným dělicím poměrem. V objektové i referenční větvi je vložen prostorový filtr a kolimační objektiv. Objektovou vlnu odraženou od zaznamenávaného objektu, jsme nechali dopadat kolmo na holografickou desku a referenční vlnu pod úhlem 30° . Vlny dopadají na holografickou desku z opačných polorovin, tím je zaručen vznik reflexního hologramu.

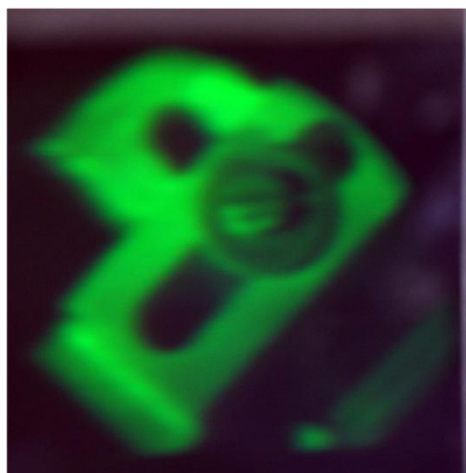
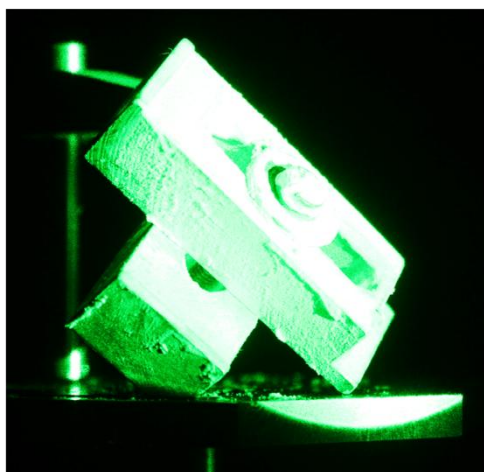


Obr. 28: Schéma záznamu reflexního hologramu.

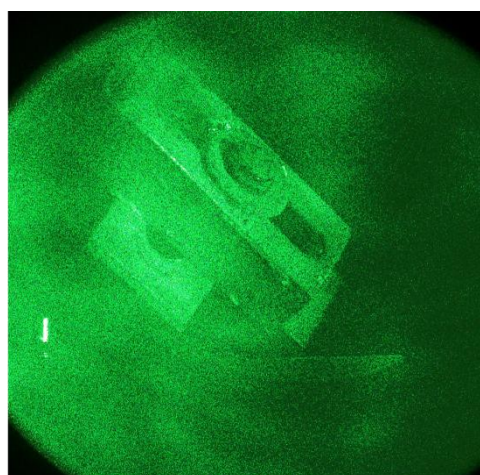
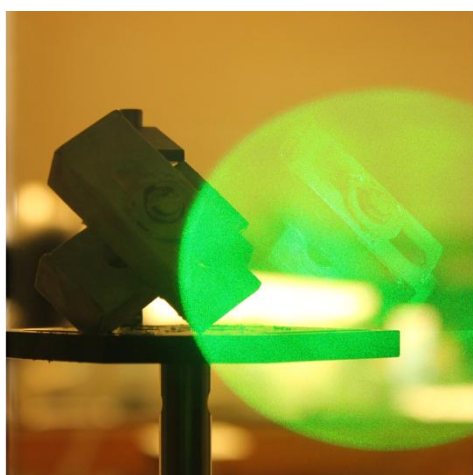
Celkový čas expozice je vypočítán v tabulce (Tabulka 3):

Tabulka 3: Výpočet času expozice.

Měření energie paprsků			
	Označení	Naměřená hodnota	Jednotka
Objektový	I_o	10,7	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Referenční	I_r	10,4	
Referenční po výpočtu (30°)	I_{ef}	9,0	
Měřený celkový součet paprsků	I_c	19,7	
Poměr paprsků			
$\frac{I_o}{I_{ef}} = \frac{10,7}{9} = 1,19$			-
Výpočet času expozice			
$t = \frac{E}{I_c} = \frac{2750}{19,7} = 139,59$			s
Skutečný expoziční čas		140	



Obr. 29: Zaznamenávaný objekt (vlevo) a rekonstrukce hotového hologramu v bílém světle (vpravo).



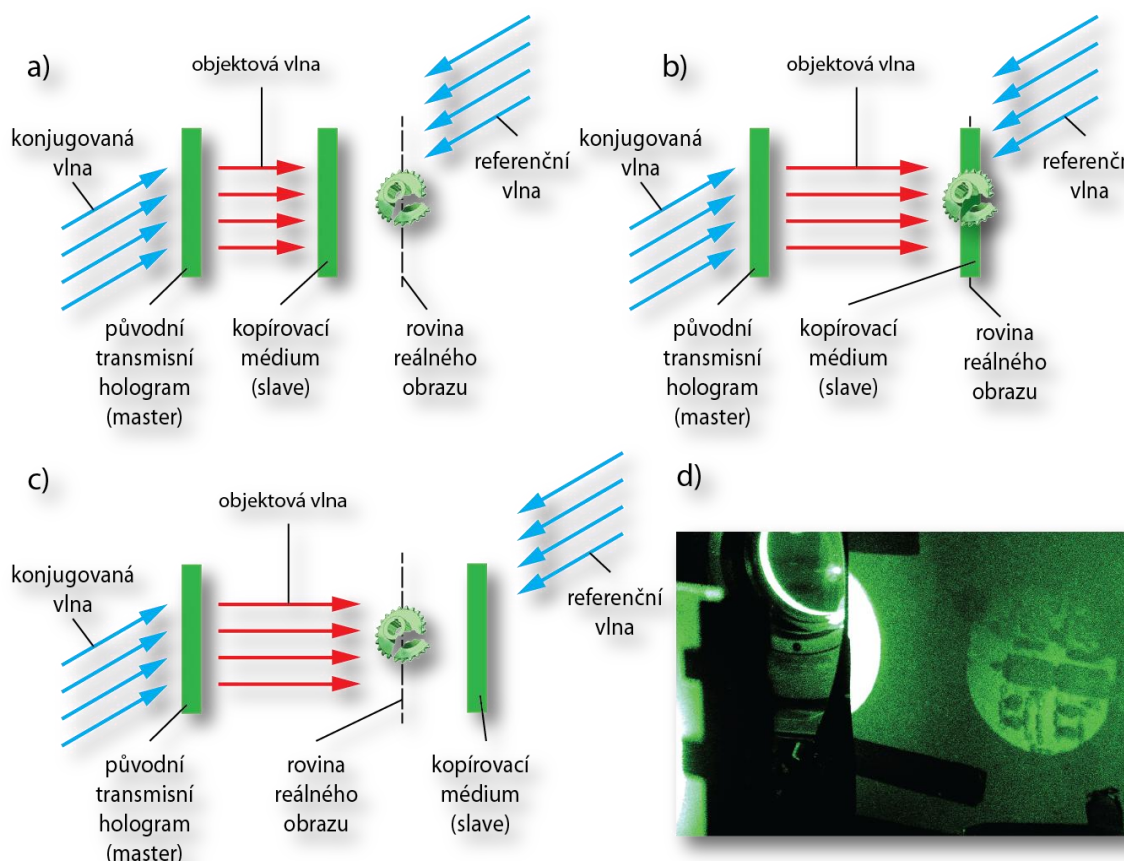
Obr. 30: Reflexní hologram rekonstruovaný svazkem laseru se záznamovým objektem v pozadí (vlevo). Reflexní hologram rekonstruovaný laserem (vpravo).

Fotografie rekonstruovaného hologramu je na Obr. 29. Vlevo je originál, vpravo je v bílém světle. Vidíme, že je trochu rozmazaný. Důvodem je, že vlnoplocha referenční vlny použité při záznamu a vlnoplocha rekonstrukční vlny se liší. To je ověřeno na obrázku Obr. 30, kde je hologram rekonstruován pomocí referenční vlny laseru a jeho obraz je velmi ostrý.

4.4 Kopírování hologramu

Při klasickém záznamu hologramů se zaznamenávaný objekt při rekonstrukci zobrazuje za rovinou holografické desky. Bylo by vhodné si tento hologram

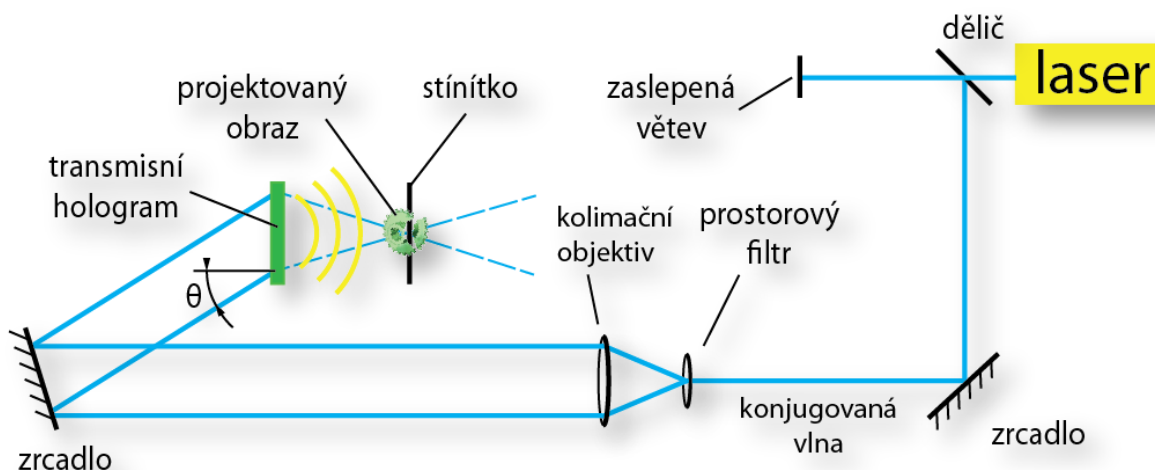
přemístit blíže. Toho můžeme docílit kopírováním mezi hologramy. Objekt z holografického masteru lze kopírováním na nové médium přemístit před, do nebo za rovinu ohniska hologramu. Hledání pozice pro umístění holografické desky pro kopírování ukazuje Obr. 31.



Obr. 31: Kopírování hologramu se změnou pozice původního objektu. Objekt mění pozici podle umístění kopírovacího média před (a), do (b) nebo za ohniskovou vzdálenost reálného obrazu (c). Rovinu reálného obrazu určíme pomocí stínítka. Jak vypadá určení roviny reálného obrazu pomocí posouvání stínítka, ukazuje obrázek d, na kterém je vidět ostrý obraz projektovaný transmisním hologramem na stínítka.

Vyrobíme si kopii transmisního hologramu (masteru), který byl vytvořen v kapitole 4.1. Bylo rozhodnuto, že kopírovaný objekt bude umístěn v rovině reálného obrazu a bude lehce pootočen, aby zasahoval i oblast těsně před touto rovinou. Nejprve je potřeba určit místo roviny reálného obrazu. Proto bylo postaveno schéma Obr. 32.

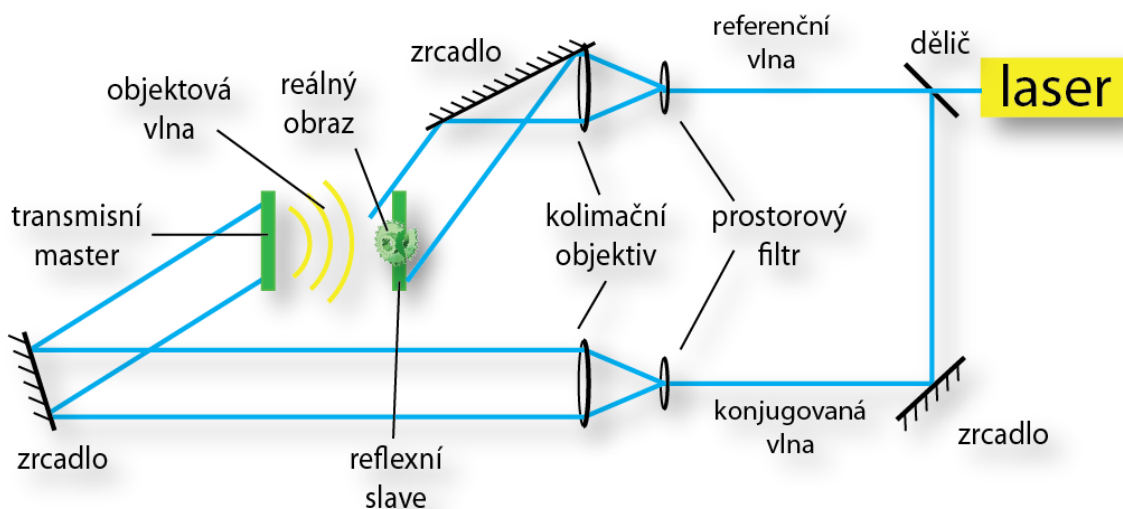
Za laserem je umístěn dělič, u kterého prozatím zaslepíme jednu větev. Průchozí svazek pokračuje do prostorového filtru a kolimačního objektivu. Master umístíme do držáku otočený vrstvou emulze ke stínítku. Nasvítíme ho konjugovanou vlnou, oproti referenční vlně použité při záznamu hologramu. (Transmisní hologram je vysoce citlivý na změnu úhlu dopadu rekonstrukční vlny, proto je nesmírně důležité, mít úhel dopadu konjugované vlny totožný s úhlem dopadu původní referenční vlny). Vzhledem k tomu, že při záznamu používáme rovinnou vlnu, konjugovaná vlna je vlna, která se šíří pouze opačným směrem. Proto nebylo zapotřebí při kopírování přestavovat celé uspořádání záznamu, ale stačilo pouze otočení hologramu v držáku, čímž jsme dosáhly konjugované vlny. Při rekonstrukci konjugovanou vlnou, dostaneme reálný konvergentní obraz, který lidské oko není schopné zaznamenat. Můžeme ho ale zobrazit na stínítku. Posunem stínítka od hologramu se ukazuje obraz projektovaný konjugovanou vlnou (Obr. 31d). V místě, kde je obraz nejostřejší, je rovina reálného obrazu. V tomto uspořádání funguje hologram jako obecný zobrazovací prvek. Do této roviny umístíme holografickou desku pro pořízení kopie hologramu.



Obr. 32: Projekce virtuálního objektu pomocí transmisního hologramu

Poté, co byla určena pozice holografické desky pro kopii hologramu, doplníme projekční schéma o druhý svazek, který nám zajistí kopírování hologramu (Obr. 33). Zaslepenou větev rozšíříme o prostorový filtr a kolimační objektiv. Protože chceme získat reflexní hologram, který budeme rekonstruovat v bílém světle,

osvítíme holografické médium z druhé poloviny, než jej osvětluje objektová vlna.



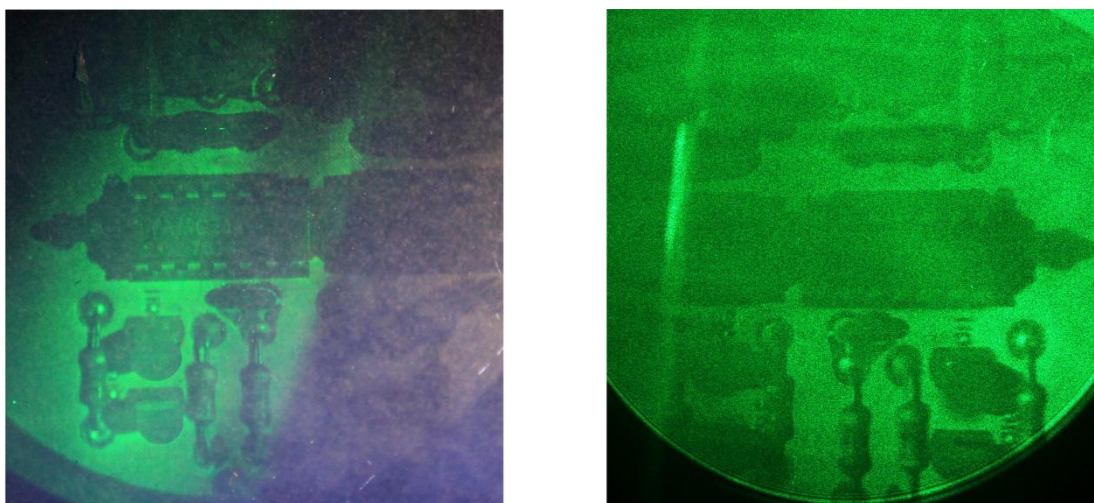
Obr. 33: Vytváření reflexní kopie hologramu z transmisního masteru.

Po sestavení schématu bylo nutné nastavit energetické poměry objektového a referenčního svazku signálu. Protože vzdálenost roviny reálného obrazu od masteru byla vysoká, výkon dopadající na kopírovací médium byl velmi nízký. Z toho důvodu byl vložen do referenčního svazku filtr FW1-2A, který utlumil výkon svazku a dosáhlo se tak vyváženějšího poměru svazků a tím vyššího kontrastu. Referenční svazek dopadal na holografickou desku pod úhlem 40° . Oproti objektovému svazku byl hologram pootočen přibližně o dva stupně, což je pro ztrátu výkonu zanedbatelná hodnota a tak jí neuvažujeme.

Celkový čas expozice:

Tabulka 4: Výpočet času expozice.

Měření energie paprsků			
	Označení	Naměřená hodnota	Jednotka
Objektový	I_o	3	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Referenční	I_r	5	
Referenční po výpočtu (40°)	I_{ef}	3,83	
Měřený celkový součet paprsků	I_c	6,83	
Poměr paprsků			
$\frac{I_o}{I_{ef}} = \frac{3}{3,83} = 0,78$			-
Výpočet času expozice			
$t = \frac{E}{I_c} = \frac{3000}{19,7} = 439,2$			s
Skutečný expoziční čas			439



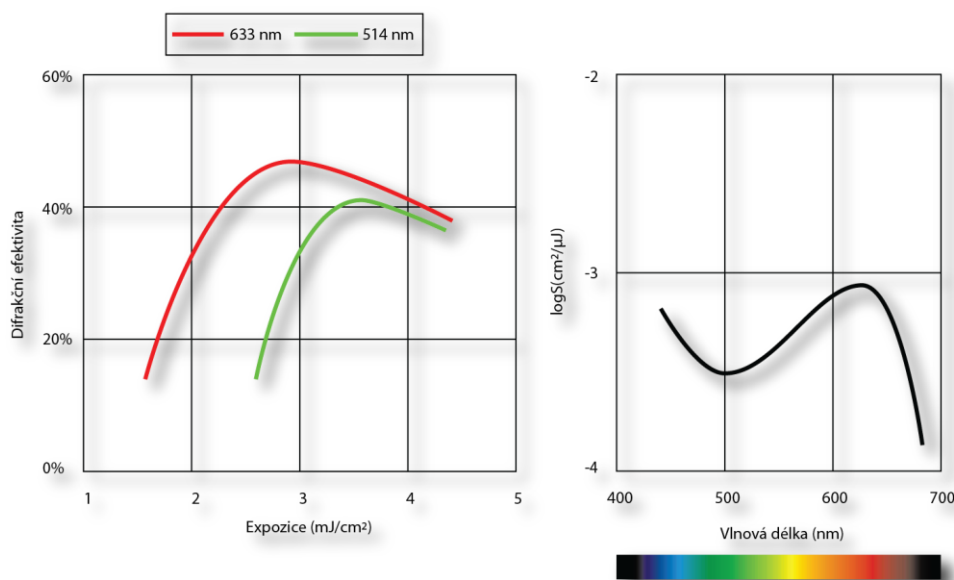
Obr. 34: Rekonstrukce reflexního hologramu v bílém světle (vlevo) a rekonstrukce laserem (vpravo)

Zkopírováním hologramu jsme dostali objekt těsně za rovinou holografické desky (Obr. 34). Obraz má oproti transmisní předloze vysokou plasticitu a zachoval si kontrast na vysoké úrovni. Oproti ostatním reflexním hologramům dosahuje daleko nejlepších výsledků při rekonstrukci v bílém světle. Mírné pootočení média při záznamu dovoluje pozorovat mírné klesání plošného spoje oproti rovině holografické desky. Tím, že se objekt hologramu přiblížil k rovině

holografické desky, byl značně zúžen rozsah úhlů, ve kterém je rekonstrukce pozorovatelná.

4.5 Vyvolání hologramu

Pro záznam hologramu byly použity vysoce jemnozrné, stříbro-halidové holografické desky PFG-03C od firmy Slawich. Tyto holografické desky jsou přímo určeny pro záznam barevných reflexních hologramů. Jejich chemické složení umožňuje zachytit obraz v celém viditelném barevném spektru. Průměrná velikost zrna je 8 nm, rozlišovací schopnost dosahuje více než 5000 řádků/mm. Spektrální citlivost je ukázána na obrázku (Obr. 35). Difrakční účinnost při zeleném světle je více než 40%



Obr. 35: Difrakční účinnost (vlevo) a spektrální citlivost (vpravo) PFG-03C.

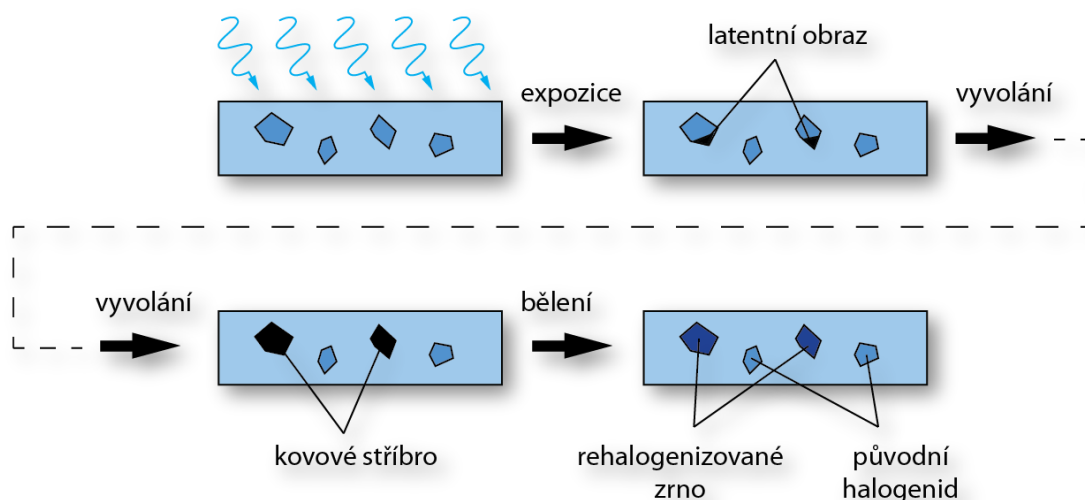
Vyvolávání holografických desek PFG-03C je možné pouze mokrou cestou. Z dokumentace k holografickým deskám, která je stažitelná na stránkách výrobce, jsme zjistili vše, co je potřebné k vyvolání desek PFG-03C. Bylo potřeba zajistit si roztoky tvrdidla, vývojky, bělidla a ustalovače. Rozhodli jsme, že si roztoky namícháme sami (Tabulka 5). Prostory a chemické sloučeniny potřebné pro namíchání roztoků poskytla katedra chemie přírodovědně-humanitní a pedagogické fakulty TUL.

Tabulka 5: Složení roztoků pro vyvolávací proces desek PFG-03C.

Tvrdidlo	
Formalín 37%	10,0 ml
Bromid draselný	2,0 g
Uhličitan sodný	5,0 g
Voda	do 1 l
PBU Amidolové bělidlo	
Persíran draselný	10,0 g
Kyselina citrónová	50,0 g
Bromid měďnatý	1,0 g
Bromid draselný	20,0 g
Amidol	1,0 g
Voda	do 1 l
Ustalovač	
Kyselina octová	20,0 g
Voda	do 1 l

Vývojka VRP	
koncentrovaný roztok:	
Siřičitan sodný (bezvodý)	194,0 g
Hydrochinon	25,0 g
Hydroxid draselný	22,0 g
Methyl fenidon	1,5 g
Bromid draselný	20,0 g
Metaboritan draselný	140,0 g
Benzotriazol	0,1 g
Destilovaná voda	do 1 l
Pracovní roztok:	
1 díl vývojky + 6 dílů vody	

Postup vyvolání holografických desek PFG-03C je následující. Po expozici o intenzitě přibližně $2750 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ následuje pět chemických lázní, mezi kterými je potřebné opláchnutí holografických desek od chemikálií. Tento oplach byl prováděn pod tekoucí vodou po délce jedné až dvou minut.



Obr. 36: Posloupnost vyvolávání stříbrohalidové emulze.

První chemická lázeň je tvrzení roztokem tvrdidla po dobu 6 minut. Následuje vyvolání vývojkou VRP po dobu 4 minut. Dále bělení PBU-Amidolovou lázní o době trvání 7 minut a jako poslední je smáčení roztokem smáčedla po dobu

jedné minuty. Celý postup chemického zpracování holografické desky je přehledně znázorněn v tabulce (Tabulka 6):

Tabulka 6: Sled vyvolávacího procesu holografických desek PFG-03C.

Reflexní hologram	PFG-03C
Expozice	2500-3000μJ/cm²
Tvrzení	Tvrdidlo, 6 min
Oplach	Voda, 1-2 min
Vývojka	VRP, 4-5 min
Oplach	Voda, 1-2 min
Bělidlo	PBU-Amidol, 5-8 min
Oplach	Voda, 1-2 min
Ustalovač	Ustalovač, 2 min
Oplach	Voda, 1-2 min
Smáčedlo	Voda se smáčedlem, 1 min
Sušení	Pomalé sušení na vzduchu

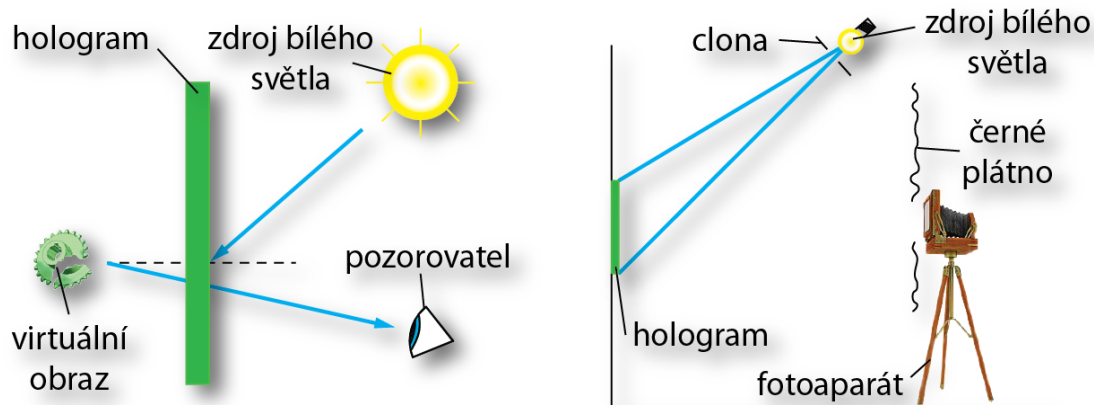
Samotné sušení se vyplatilo neuspěchat a nechat doběhnout chemické reakce ve fotografické emulzi. Navíc i při velmi nízké vlhkosti holografické desky byl při prohlížení zaznamenaný obraz značně rozmazaný a téměř nečitelný.

V průběhu práce v optické laboratoři se nám stalo, že roztok bělidla přestal mít požadované vlastnosti. Byl starý čtrnáct dnů a pouze jednou použitý. Hologramy vyvolávané tímto bělidlem neprošli procesem bělení a převodu amplitudové mřížky na fázovou. Proto jsou takto vyvolané hologramy neprůhledné a mají nízkou difrakční účinnost. Musel být proto namíchán nový roztok bělidla.

4.6 Rekonstrukce hologramu v bílém světle

Při rekonstrukci hologramu v bílém světle se snažíme dosáhnout co nejvyššího kontrastu, který získáme použitím stejné vlnoplochy, jako byla vlnoplocha použitá při záznamu. Vzhledem k tomu, že při záznamu byla používána rovinná vlna, pro rekonstrukci byl použit bodový zdroj světla ve vzdálené zóně, kde se vlny dají aproximovat rovinnou vlnou. Velmi vhodný zdroj pro rekonstrukci je sluneční záření, které se nám vzhledem ke vzdálenosti Slunce od země jeví jako bodové. Hologram umístíme na stěnu a nasvítíme ho zdrojem bílého světla

(Obr. 37). Čím více bude úhel nasvícení odpovídat úhlu dopadu referenční vlny použité při záznamu, tím bude mít rekonstruovaný obraz vyšší kontrast, intenzitu a menší zkreslení. Je velmi důležité, aby spojnice každého bodu pozorovaného obrazu a oka pozorovatele protínala hologram. Rozsah úhlů, ve kterém je rekonstrukce pozorovatelná, souvisí s velikostí hologramu a vzájemnou polohou hologramu a objektu.



Obr. 37: Rekonstrukce reflexního hologramu v bílém světle (vlevo) a jeho vyfotografování (vpravo).

Fotografování hologramu provádíme zejména za účelem publikování. Fotografie ale nese jen zlomek původní informace zdroje, který jsme tímto ochudili o celý třetí rozměr. Navíc je celý proces fotografování náročný, protože snímáme záznam uložený na skleněné desce. Z důvodu nasvícení, je těžké vyhnout se různým nechtěným odleskům a odrazům světla. Vyzkoušené a doporučené schéma záznamu hologramu na fotoaparát je ukázáno na Obr. 37.

Závěr

Cílem bakalářské práce je studie výroby difrakčních struktur rekonstruovatelných v bílém světle holografickou cestou a jejich praktická realizace.

Rešeršní část práce popisuje princip holografie, druhy hologramů a jejich vlastnosti. Ukázalo se, že reflexní hologramy mají vzhledem k jejich vysoké citlivosti na vlnovou délku potenciál být rekonstruovány bílým světlem bez výraznější deformace rekonstruovaného obrazu. Naopak z rešerše vyplývá, že transmisní typ hologramů je pro rekonstrukci bílým světlem nevhodný. Na základě těchto poznatků byla navržena různá holografická uspořádání pro zhotovení hologramů rekonstruovatelných bílým světlem.

V experimentální části byla tato uspořádání zrealizována. Nejprve bylo postaveno Dënisjukovo schéma, které má nejmenší hardwarové nároky, jelikož se jedná o jednosvazkové uspořádání. Daní za nižší hardwarové nároky je nižší účinnost, neboť nelze nastavit poměr intenzity referenční a objektové vlny. Další nevýhodou je malý úhel mezi referenční a objektovou vlnou, což často způsobuje stínové efekty při pozorování rekonstruovaného hologramu.

Tyto nedostatky byly vyřešeny pomocí Leith-Upatniekova mimoosového dvousvazkového uspořádání. Náročnější dvousvazkové uspořádání umožňuje velmi přesně nastavit požadovaný poměr intenzit i libovolný úhel mezi referenční a objektovou vlnou.

Rekonstrukce zmíněných hologramů zobrazuje zaznamenaný objekt vždy za rovinou hologramu. Aby bylo možné zaznamenat hologram, kde rekonstruovaný objekt bude zobrazen v rovině hologramu, popř. některé části objektu budou vystupovat před rovinu hologramu směrem k pozorovateli, byla použita dvou kroková metoda kopírování hologramu. Nejprve byl pomocí Leith-Upatnikova uspořádání zaznamenan transmisní hologram. Rekonstrukcí transmisního hologramu konjugovanou vlnou bylo docíleno zobrazení reálného obrazu. Hologram v tomto případě sloužil jako obecný zobrazovací optický element. V dalším kroku byl do ohniskové roviny hologramu umístěn nový hologram, na který byl zaznamenan reálný obraz z transmisního hologramu. Nově zaznamenaný hologram byl reflexního typu, a může být rekonstruován bílým

světlem. Kopírováním hologramu je tedy možné zobrazit rekonstruovaný objekt v libovolné relativní pozici k rovině hologramu. Nevýhodou tohoto přístupu je menší interval úhlů při pozorování hologramu a větší šum.

Dosud se v Laboratoři optických metod na TUL vyráběli pouze transmisní hologramy, které v bílém světle rekonstruovat nelze, a proto práce rozšiřuje portfolio technik výroby hologramů. Získané hologramy budou sloužit pro pedagogické a reprezentativní účely Laboratoře. Práce poslouží také jako základ pro výrobu Lippmanovi fotografie.

K práci je přiloženo CD obsahující elektronickou verzi bakalářské práce.

Bibliografie

- [1] V. Lédli, Fotopolimenární záznamová média pro použití v holografické interferometrii, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009.
- [2] P. Psota, Application for digital holographic interferometry measurement, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [3] M. Krynický, „Huygensův princip, odraz vlnění. Učebnice realisticky,“ 2009. [Online]. Available: <http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika/03%20Kmitav%C3%BD%20pohyb%20a%20mechanick%C3%A9%20vln%C4%9Bn%C3%AD/02%20Mechanick%C3%A9%20vln%C4%9Bn%C3%AD/04%20Huygens%C5%AFv%20princip,%20odraz%20vln%C4%9Bn%C3%AD.pdf>. [Přístup získán 10 1 2012].
- [4] M. Šiňor, „Interference světla,“ 5 7 1998. [Online]. Available: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node7.html>. [Přístup získán 1 3 2012].
- [5] M. J. Parry a M. W. Davidson, „Thomas Young's Double Slit Experiment,“ 2006. [Online]. Available: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/interference/doubleslit/>. [Přístup získán 1 3 2012].
- [6] P. Fiala a I. Rychter, Fyzikální optika, Praha: ČVUT, 2005.
- [7] M. Pavelek, E. Janotková a J. Štětina, „Vizualizační a optické měřicí metody,“ 2007. [Online]. Available: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>. [Přístup získán 1 3 2012].
- [8] A. Lane, „History of holography,“ [Online]. Available: <http://www.holophile.com/history.htm>. [Přístup získán 5 3 2012].
- [9] P. Fiala, I. Rychter a Z. Ryzí, „Optika a moderní technologie: Difrakce, difrakční struktury, holografie a mikrooptika,“ 1998. [Online]. Available: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/>. [Přístup získán 7 2 2012].
- [10] P. Hariharan, Basic of Holography, Cambridge: University of Cambridge, 2002.
- [11] J. W. Goodman, „Introduction to Fourier Optics,“ 1996. [Online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/37097287/8/THE-LEITH-UPATNIEKS-HOLOGRAM>. [Přístup získán 15 1 2012].
- [12] G. Saxby, Practical Holography Third Edition, Bristol and Philadelphia, 2004.